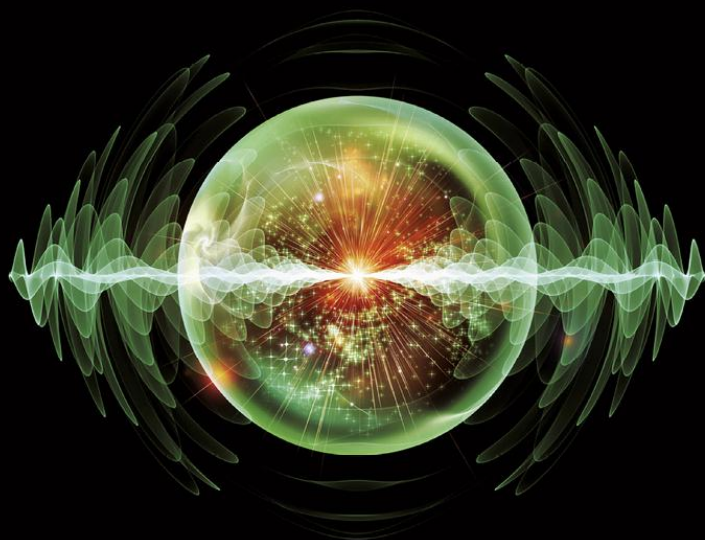


UGO BARDI

LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO

RETOMADOS

PRÓLOGO DE FEDERICO MAYOR ZARAGOZA
Y EPÍLOGO DE JORGE RIECHMANN



IUDC
Instituto
Universitario
de Desarrollo
y Cooperación

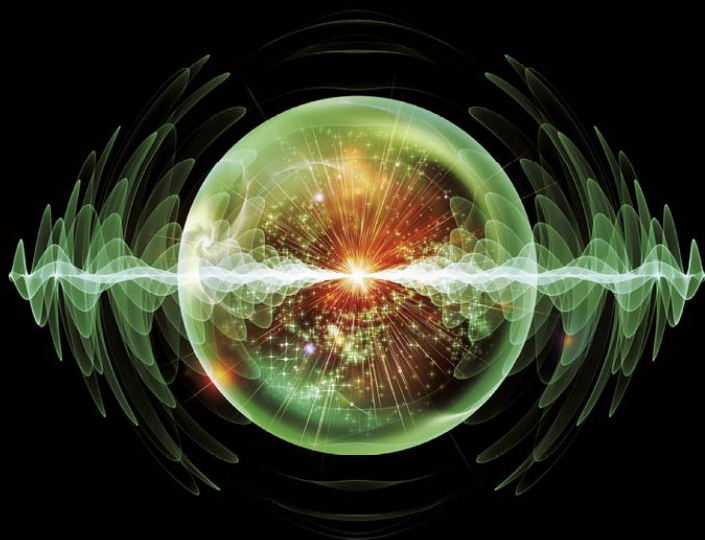
UCM
UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

UGO BARDI

LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO

RETOMADOS

PRÓLOGO DE FEDERICO MAYOR ZARAGOZA
Y EPÍLOGO DE JORGE RIECHMANN



IUDC
Instituto
Universitario
de Desarrollo
y Cooperación

UCM
UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

UGO BARDI

LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO

RETOMADOS

PRÓLOGO DE FEDERICO MAYOR ZARAGOZA
Y EPILOGO DE JORGE RIECHMANN



IUDC
Instituto
Universitario
de Desarrollo
y Cooperación

uCM
UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

Ugo Bardi

Profesor de Fisicoquímica en la Universidad de Florencia, Italia. Sus investigaciones se centran en la búsqueda de materiales para nuevas fuentes de energía y en el estudio de la explotación de los recursos naturales. Es miembro del comité científico de la Asociación para el Estudio del cenit del petróleo (ASPO) y presidente de la sección italiana de dicha asociación. También es un colaborador habitual de la página web ‘The Oil Drum’ y de otras más, dedicadas a las energías renovables y la sostenibilidad.

Ugo Bardi

Los límites del crecimiento

retomados



Serie Desarrollo y Cooperación

dirigida por Enara Echart y José Ángel Sotillo

La edición de este libro ha contado con el apoyo del Máster en Cooperación Internacional Descentralizada: Paz y Desarrollo de la Universidad del País Vasco.

DISEÑO DE CUBIERTA: ESTUDIO PÉREZ-ENCISO

Translation from English language edition:

The Limits to Growth Revisited

by Ugo Bardi

Copyright © 2011

Springer New York

Springer New York is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

© de la traducción: Juncal Gilsanz Blanco y Rocío López Ruiz

© Los libros de la Catarata, 2014

Fuencarral, 70

28004 Madrid

Tel. 91 532 05 04

Fax. 91 532 43 34

www.catarata.org

Los límites del crecimiento retomados

isbne: 978-84-9097-789-7

ISBN: 978-84-8319-871-1

DEPÓSITOLEGAL: M-186-2014

IBIC: RNFY/RNU

Este libro ha sido editado para ser distribuido. La intención de los editores es que sea utilizado lo más ampliamente posible, que sean adquiridos originales para permitir la edición de otros nuevos y que, de reproducir partes, se haga constar el título y la autoría.

Este libro está dedicado a la memoria de Matthew Simmons (1943-2010), incondicional de los estudios sobre el pico del petróleo, defensor de la energía renovable y uno de los primeros en dar una nueva visión de Los límites del crecimiento en el siglo XXI.

More bright shall blow the wind of prophecy, and as against the low bright line of dawn heaves high and higher yet the rolling wave, so in the clearing skies of prescience dawns on my soul a further, deadlier woe, and I will speak, but in dark speech no more.

[...] brillante, estoy segura, llegará soplando hacia el sol naciente, de suerte que una desgracia mucho mayor surgirá, como una ola, a la luz. Ya no os informaré por medio de enigmas.

Palabras de Casandra extraídas de Agamenón

(Esquilo, 458 a.C.)

PRÓLOGO A LA EDICIÓN ESPAÑOLA

Nos advirtieron hace décadas de los problemas que hoy debemos enfrentar con urgencia. Si hubiéramos escuchado estaríamos preparados para tratar debidamente el calentamiento global y la disminución de recursos.

Ugo Bardi

La edición española de *The Limits to Growth Revisited*, de Ugo Bardi, ha sido fruto del entusiasmo y la capacidad movilizadora de José Ángel Sotillo, director del Instituto Universitario de Desarrollo y Cooperación de la Universidad Complutense de Madrid. La cuidada publicación se debe a la editorial Los Libros de la Catarata (Serie Desarrollo y Cooperación).

Aurelio Peccei era un personaje extraordinario. Sabía que únicamente el conocimiento profundo de la realidad podía esclarecer los horizontes sombríos de un mundo en el cual solo el 20 por ciento de la humanidad habitaba en condiciones de vida digna el barrio próspero de la aldea global. Y Peccei se preguntaba permanentemente por el conjunto de la humanidad. Por la necesidad de aplicar de forma adecuada el conocimiento disponible con el fin de que se hiciera realidad el principio básico que debe guiar permanentemente nuestro comportamiento cotidiano: la igual dignidad de todos los seres humanos.

Aurelio Peccei, empresario italiano de gran relieve, reunió a científicos, filósofos, sociólogos, economistas a finales de los años cincuenta en la Accademia dei Lincei de Roma. Escribe — pensando siempre en que el por-venir está por-hacer— un libro, de *The chasm ahead* (“el abismo delante de nosotros”),

cuyo borrador tiene la oportunidad de discutir nada menos que con el presidente John Fitzgerald Kennedy, al tiempo que inicia la constitución del Club de Roma, que reúne a grandes figuras del pensamiento y la prospectiva de aquel momento: Alexander King, André Danzin, Ricardo Díez Hochleitner, Elisabeth Mann Borgese [...] van ampliando el núcleo inicial hasta los cien miembros “numerarios” de que consta el Club de Roma.

Peccei enseñaba a mirar las cosas de otro modo y había siempre en sus planteamientos un destello de esperanza, por el convencimiento de que la facultad creadora que distingue a los seres humanos era la gran fuerza que podía finalmente marcar nuevos derroteros a la Tierra en su conjunto. En él iban de la mano de la com-pasión y el deseo de com-partir.

La mejor definición del Club de Roma —decía con cierta ironía— es que se trata de una “no organización no gubernamental”. En sus análisis, los componentes de la realidad interactuaban y la complejidad adquiría caracteres de funcionalidad. Los factores políticos, naturales, económicos, sociales... propios del sistema global en el que vivimos no cesaban de influirse mutuamente, de tal modo que podían deducirse medidas apropiadas para fomentar los aspectos positivos y evitar o paliar los más lesivos.

En El abismo enfrente, aparecido en 1969, Aurelio Peccei propone nuevos enfoques y grandes cambios de dirección en las tendencias que en aquel momento prevalecían. Era necesario contrarrestar la transformación del mundo por la tecnología de la guerra y el crecimiento industrial desmesurado. Creía firmemente que la razón puede, aplicada debidamente y a tiempo, conservar el sistema global y mejorar las condiciones de vida de la humanidad. Reconoce el papel fundamental de la comunicación, coincidiendo en algunos de los planteamientos con Marshall McLuhan. Frente a la pobreza, la degradación del medio ambiente, la desafección política personal e institucional, la mecanización e informatización, el decaimiento ético... son necesarios planteamientos radicalmente distintos. Es preciso inventar el devenir.

La primera fase de los estudios que condujeron a las Perspectivas de la humanidad, con el título final de Los límites del crecimiento, se realizó bajo la dirección de Donella y Dennis Meadows, del MIT (Boston). Los principales factores que limitan el crecimiento son la demografía, la producción alimenticia, los recursos naturales, la contaminación y la industria. No solo se señalan los límites, sino las nuevas ideas que son necesarias para no transgredirlos. En unas frases introductorias, el excelente secretario general de las Naciones Unidas, U Thant, escribía en 1969: “Es necesario un acuerdo global para desacelerar la carrera armamentística, mejorar el medio ambiente humano, moderar el crecimiento demográfico y dedicar al desarrollo todos los esfuerzos que se requieren [...]”.

Cada una de estas grandes dimensiones tiene a su vez una serie de facetas que deben considerarse: así, en el caso del crecimiento exponencial de las emisiones de anhídrido carbónico no solo debemos tener en cuenta el consumo de carburantes, sino la recaptura del anhídrido carbónico por la clorofila, especialmente por el agua de los océanos, que constituyen —el mar ocupa el 70 por ciento de la superficie de la Tierra— los grandes “pulmones” del planeta y obligan a atender a la calidad de los mares —especialmente del fitoplancton— para disminuir de este modo la cantidad de CO₂ ambiental.

Velar por la salud de la “biosfera”, término que implica, como lo recuerda el autor, que todos los seres vivos son parte de una sola “entidad”. Es una visión comprensiva del conjunto de la tierra, mar y aire, de la fauna y de la flora, y, sobre todo, de la especie humana, la única que podía, en virtud de su propia actividad, influir en las características ecológicas.

Es oportuno mencionar ahora una vida “paralela” a la de Aurelio Peccei, la del profesor Jay Wright Forrester, quien al final de la década de los cuarenta, en el Massachusetts Institute of Technology, en Boston, utilizó ya una nueva generación de ordenadores para facilitar las interacciones máquina-sistemas electrónicos. Unos años más tarde (1958) se

refirió a la “dinámica industrial”, de donde procede el término, tan relevante desde entonces, de “dinámica de sistemas”, ya que permitió simular el conjunto del sistema económico mundial. A mediados de los sesenta, la capacidad operativa digital ya era suficiente para permitir unir el ecosistema a las simulaciones económicas.

En 1971, Forrester publicó el *World Dynamics*, un año antes de que apareciera *Los límites del crecimiento*, informe al Club de Roma. Ambos trabajos llegan a la misma conclusión: la economía mundial tiende a detener su crecimiento y colapsar como resultado de la combinación de una disponibilidad reducida de recursos, población excesiva y contaminación. Según sus previsiones, el declive de la economía mundial tendría lugar al cabo de 30-40 años. En el mejor de los escenarios prospectivos, el descalabro podría aplazarse pero no evitarse, si no se tomaban las medidas adecuadas.

Muchos economistas fueron muy críticos con estas previsiones y, una vez más, se equivocaron. No se trataba, en efecto, de confiar en la capacidad “autorreguladora” de los mercados, sino de reducir desigualdades, adoptando decisiones políticas de hondo calado.

Sus previsiones eran válidas. Las descalificaciones desmesuradas son propias de un neoliberalismo centrado exclusivamente en los beneficios a corto plazo. Como alarma, hubiera debido ser atendida. Ahora, con buen sentido, con conocimiento profundo de la realidad, pueden ponerse en práctica muchas de las decisiones que —¡a qué precio de hambre, sufrimiento y sometimiento!— se demoraron indebidamente hace ya mucho tiempo.

Ugo Bardi incluye todo un capítulo sobre la modelización del mundo por dinámica de sistemas. Los cinco elementos fundamentales del modelo son: la población humana, la contaminación, las inversiones de capital, la agricultura (recursos renovables) y los minerales (recursos no renovables).

Se examinan en tres distintos conjuntos de posibilidades:

- 1. Diferentes parámetros en los insumos.** Por ejemplo, mayores cantidades de recursos naturales.
- 2. Efectos tecnológicos.** Por ejemplo, mayor eficacia en la explotación, mayores rendimientos agrícolas y mejora de la capacidad para reducir la contaminación.
- 3. Cambios en las medidas políticas.** Por ejemplo, control poblacional.

*Los límites del crecimiento apareció, en nuevas versiones, en 1992 —20 años después de la primera edición— y en 2004. En 2011 se publica *The Limits to Growth Revisited*, por el profesor de la Universidad de Florencia, del Departamento de Química, Ugo Bardi, editado por Springer, con unas palabras introductorias del actual secretario general del Club de Roma, Ian Johnson. El libro está dedicado a la memoria de Matthew Simmons (1943-2010), “promotor de las energías renovables y uno de los pioneros en reconsiderar los límites del crecimiento en el siglo XXI”.*

La primera edición del libro y las tres posteriores han demostrado que quienes rechazaron entonces y siguen ahora rechazando criterios de buen sentido para que el desarrollo esté al servicio de la humanidad entera y no al revés, es porque no se responsabilizan de la calidad de vida de las generaciones venideras, “compromiso supremo de toda generación”, en palabras del presidente Nelson Mandela. Lo que procede es establecer unas prioridades fundamentales que permitieron que las condiciones para una vida digna no fueran privilegio de unos cuantos, sino un derecho unido al propio misterio de la existencia humana.

Para ello es de destacar que en todas sus ediciones no solo se advertía y alertaba, sino que se proponían medidas correctoras apropiadas.

El desarrollo debía ser no solo económico, sino social y

cultural, es decir, integral. Y endógeno, es decir, que no debía solo proceder de una “ayuda” exterior, sino del desarrollo de las propias habilidades y destrezas. La primera ministra de Noruega, Gro Harlem Brundtland, presidiendo la Comisión sobre el Medio Ambiente en la década de los ochenta, incorporó el importante criterio de sostenibilidad, lo que supone que lo que se consume debe ser, en toda la medida de lo posible, repuesto.

Y, por fin, en 1988, el administrador adjunto de UNICEF, Richard Jolly, publica el libro *Development with Human Face*, que establece que el desarrollo debe ser humano, ya que la condición humana es la protagonista y beneficiaria del mismo.

Carentes de un multilateralismo democrático —el Sistema de las Naciones Unidas fue totalmente marginado por los neoliberales globalizadores— que hubiera podido fomentar y hasta exigir como prioridad mundial el adecuado cuidado de la habitabilidad de la Tierra, lo que es cierto es que, actualmente, cuarenta años después de la aparición del informe *Los límites del crecimiento*, se han cumplido, por desgracia, buena parte de los vaticinios: calentamiento global, cambio climático, decrecimiento de la biodiversidad...

Por ello, el autor hace hincapié en aquellas decisiones que podrían conducir a una recuperación, al menos parcial, de la confianza de la especie humana en seguir la brújula adecuada.

El futuro no está escrito. Debemos inventarlo. Es la gran tarea de la humanidad que, por primera vez en la historia, ha dejado de ser invisible y anónima y puede asumir responsabilidades desde la escala personal a la global.

En la “nueva visita” se plantean preguntas de gran relieve por la validez de las tesis defendidas en las versiones previas: ¿los recursos minerales son realmente finitos?, ¿puede la nueva tecnología evitar la extinción de estos recursos? El resultado es que, en buena medida, los avisos eran válidos y que hay muchas lecciones que aprender de los supuestos originales.

Lo relevante en la acción del vigía no es que precise exactamente y con detalle el tema que le lleva a avisar con

apremio sobre los peligros y la necesidad de cambiar de rumbo, sino en que consiga, con las señales y acciones precisas, que se encaucen debidamente los caminos del mañana. Los modelos y los modales pueden criticarse, pero el grito no debe ser desoído.

La era digital permitirá, al aumentar considerablemente la capacidad predictiva, que los “límites del crecimiento” tengan ahora el impacto que se merecen. Ahora, con mayor apremio todavía, por la “ética del tiempo”, dada la irreversibilidad potencial de los procesos que se consideran. Es necesario adoptar medidas paliativas y preventivas. Hay que recuperar el tiempo perdido.

Como antes indicaba, es necesario que se restablezca la autoridad, moral y efectiva, de un Sistema de Naciones Unidas que permita el inicio de una nueva era en que sean “los pueblos” —como tan lúcidamente inicia la Carta de las Naciones Unidas— los que tengan realmente en sus manos las riendas del destino común.

Leyendo el libro de Ugo Bardi he pensado que ahora es más urgente que en el pasado —porque disponemos de una conciencia global, de una tecnología de la comunicación y de la información extraordinaria, de un gran número de conocimientos que pueden aplicarse sabiamente— escuchar las advertencias de esta obra importantísima.

¡Qué bien que se haya visitado de nuevo! Conscientes de estar viviendo ya en el antropoceno, los seres humanos —como recomienda la “Carta de la Tierra”— deben elegir su futuro. Deben procurar una gran inflexión de las actuales tendencias y propiciar un “nuevo comienzo”.

Federico Mayor Zaragoza

21 de noviembre de 2013

PRÓLOGO

El informe al Club de Roma titulado Los límites del crecimiento (LDC), fue publicado en 1972 y es considerado uno de los libros más influyentes del siglo XX. Sus mensajes dejaron profundas huellas en muchos individuos a lo largo del mundo a quienes hoy podemos encontrar en posiciones influyentes de la política, la Administración, la sociedad civil o el ámbito académico. El informe LDC fue el catalizador que abrió nuestras mentes a la verdad del precario estado del planeta. Sus autores fundaron un grupo de reflexión que perdura hasta nuestros días.

El mensaje central que contenía LDC, y que se vio reforzado en dos versiones posteriores, la más reciente de 2004, era que en un mundo finito el consumo de materiales y la contaminación no podían continuar creciendo para siempre. Cuando el libro de LDC fue publicado, provocó una amplia discusión que rápidamente pasó de ser un debate científico a convertirse en un debate político conducido por ideologías e intereses particulares. A pesar de que a menudo se representan como tal, ninguno de los estudios de LDC era una predicción de una fatalidad inevitable, sino, más bien, LDC “abogaba por una profunda y proactiva innovación social a través de cambios tecnológicos, culturales e institucionales con el objeto de evitar un aumento de la huella ecológica de la humanidad más allá de la capacidad de carga del planeta”. A pesar de que LDC previno de la dirección que el mundo estaba tomando hacia la posibilidad del colapso, también era optimista sobre los cambios que se podían producir si la sociedad comenzaba a reconocer el estado del desarrollo global y llevaba a cabo acciones correctoras. Con demasiada frecuencia las críticas optaron por ignorar los mensajes principales del informe.

Lo que fue considerado futurista hace 40 años, ha pasado a ser

hoy una realidad. Nos encontramos en una situación de “extralimitación” en algunos campos y está empezando a ser obvio para más y más personas que hemos entrado en una era peligrosa: el calentamiento global, el pico del petróleo, la extinción de la biodiversidad y una resiliencia reducida del ecosistema por nombrar algunas consecuencias. En algunos casos contamos con sustitutos, pero a muy altos costes; en otros casos, como el de la biodiversidad, tenemos muchos menos conocimientos sobre el impacto de su destrucción si esta tuviera lugar.

Como secretario general del Club de Roma, celebro el abanico de cuestiones cubierto por este oportuno libro, *Los límites del crecimiento* retomados de Ugo Bardi. Su libro nos permite una mejor comprensión de la polémica que siguió a la publicación de LDC y, al mismo tiempo, hacernos una idea de la modelización dinámica y de algunos de los principales argumentos debatidos. Debería ser una lectura obligatoria para aquellos interesados en nuestro futuro común y en una mejor comprensión de cómo se puede malinterpretar y denostar la buena ciencia y el análisis.

Ian Johnson

Secretario general del Club de Roma y

ex vicepresidente para Desarrollo Sostenible del Banco Mundial

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a Jay Wright Forrester, pionero de la dinámica de sistemas, quien, a pesar de que cuando comencé a escribir este libro ya estaba cerca de los 90 años, me facilitó perspectivas, información y una gran ayuda sobre el tema de la dinámica de sistemas. Agradecer a Dennis Meadows y a Jorgen Randers, dos de los autores del primer libro de Los límites del crecimiento, que me ayudaron a profundizar en el complejo objeto de su estudio. También quisiera agradecer a Karl Wagner y a Ian Johnson, del Club de Roma, así como a Colin Campbell y a los miembros de la Asociación para el Estudio del Peak Oil (ASPO) por su apoyo.

Finalmente, mi agradecimiento a todos aquellos que me brindaron consejo, crítica o que de cualquier forma contribuyeron a la realización de este libro: Janet Barocco, Nicola dall'Olio, Charles Hall, Richard Heinberg, Marek Kolodziej, Magne Myrtveit, Giorgio Nebbia, David Neiman, Jorgen Noorgard, William Nordhaus, Alessandro Lavacchi, David Packer, Douglas Reynolds, David Roser, Gail Tilverberg, Leigh Yaxley y Richard Worthington.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El siglo XX fue un periodo de expansión económica sin precedentes, de crecimiento de la población y de progreso tecnológico. Todo ello generó un gran optimismo en el futuro de la humanidad, una actitud que fue especialmente prevalente en los años que siguieron a la Segunda Guerra Mundial. El crecimiento económico experimentado hasta entonces se veía como el estado natural de las cosas, mientras que el crecimiento de la población no era percibido como un problema. Los viajes al espacio, los coches voladores, la extensión de la vida humana, la energía “demasiado barata para ser medida” y muchas otras maravillas tecnológicas eran vistas como algo que estaba a la vuelta de la esquina.

Sin embargo, el siglo XX fue también el momento en el que se formularon preguntas fundamentales sobre el destino de la humanidad. ¿Durante cuánto tiempo podría seguir creciendo la economía en un planeta finito? ¿Podría continuar el crecimiento de la población al ritmo experimentado hasta entonces? ¿Cuáles eran los límites materiales definitivos de la civilización?

A finales de los años sesenta, un comité de expertos que se referían a sí mismos como Club de Roma empezó a buscar respuestas cuantitativas a estas preguntas. Para su búsqueda se dirigieron a un grupo de científicos del Instituto Tecnológico de Massachusetts, en Cambridge, MA, que participó en la ambiciosa tarea de modelizar la evolución del sistema económico mundial durante un periodo de tiempo de más de un siglo. El resultado fue el estudio publicado en 1972 bajo el título *Los límites del crecimiento* (LDC) (Meadows et al., 1972) con el subtítulo *Un informe al Club de Roma*.

Los resultados del estudio distaban de ser optimistas. Las simulaciones mostraron que, en un conjunto de supuestos como los conocidos hasta el momento, el crecimiento

económico no podría mantenerse durante el siglo XXI. En el modelo, la merma gradual de los recursos no renovables, unida al aumento de la contaminación y el crecimiento de la población, daban como resultado el alcance de máximos y el subsiguiente declive de la industria mundial y de la producción agrícola. A esta situación le seguiría, algo más tarde, el decrecimiento de la población como consecuencia de la disponibilidad reducida de alimentos y servicios.

El escenario del “caso base” del estudio, el modelo que utilizaba parámetros basados en la mejor situación posible, generaba el comienzo del colapso de la producción industrial y agrícola en algún momento de la segunda década del siglo XXI. Los escenarios basados en presunciones más optimistas sobre la disponibilidad de los recursos naturales podrían solamente posponer el colapso, pero no evitarlo. Únicamente intervenciones específicas encaminadas a frenar el crecimiento económico y reducir el consumo de los recursos naturales podrían colocar a la humanidad en una trayectoria sostenible y así evitar el colapso.

Estos resultados supusieron una conmoción para un mundo en el que se había experimentado un rápidocrecimiento económico durante al menos dos décadas. El libro generó un enorme interés y se desencadenó un debate sobre su validez. Algunos reconocieron en él un hito del pensamiento, mientras que otros lo rechazaron por considerarlo un ejercicio inútil basado en suposiciones incorrectas.

A pesar de que el debate inicialmente estaba equilibrado, gradualmente las críticas fueron ganando terreno y finalmente las opiniones negativas al respecto prevalecieron. En los años noventa, tanto el estudio de LDC como sus autores se vieron sumergidos en una ola de críticas, a menudo basadas en la afirmación de que el estudio había realizado predicciones erróneas al estimar que algunos recursos minerales importantes se agotarían antes de que finalizara el siglo XX (Bailey, 1989).

La opinión negativa sobre LDC parece que prevalece todavía. Sin embargo, también se están dando evidentes signos de un

nuevo planteamiento. Esta nueva tendencia comenzó con el trabajo de Matthew Simmons (2000), quien repasó el libro de LDC de 1972 y lo consideró válido en lo referido a la descripción de la situación del mundo. Varios autores reexaminaron el estudio. Myrteveit (2005) consideró que el debate se encontraba lejos de estar resuelto en contra del caso de LDC. Turner (2008) y Hall y Day (2009) consideraron que el escenario del “caso base” de LDC describía extraordinariamente bien el comportamiento de parámetros como el crecimiento de la población, el agotamiento de los recursos o la contaminación durante los 30 últimos años. Bardi (2008a) revisó algunas de las percepciones erróneas comunes acerca de los resultados del estudio, observando que la opinión ampliamente aceptada de que LDC había realizado “predicciones erróneas” se basaba en una lectura equivocada de algunos de los datos presentados en el libro de 1972. Bardi (2008b) y Hall y Day (2009) señalaron la similitud entre los modelos de LDC y los desarrollados por Hubbert (1956) para la modelización de la producción de crudo. Otros autores (Nebbia, 2001; Gardner, 2004; Busby, 2006; Nørgård et al., 2010; Heinberg, 2010) pusieron de relieve que LDC podría haber sido rechazado desde una base de argumentos equivocados, e insistían en una reevaluación del mismo. Algunos de los autores del primer LDC publicaron un nuevo estudio basado en los mismos métodos y que confirma los resultados del de 1972 (Meadows et al., 2004).

Por otro lado, el estudio de LDC continúa recibiendo críticas negativas, incluso desde la literatura científica reciente (véase, por ejemplo, Popper et al., 2005; Radetzki, 2010). Parece, por ello, que el debate que se desencadenó en los años setenta vuelve a avivarse con dos líneas de pensamiento opuestas, enfrentándose la una a la otra. Una, favorable a LDC, pone el énfasis en los límites físicos del planeta en el que vivimos; la otra, contraria, insiste en la importancia del progreso y en el ingenio humano para enfrentarse a los retos que se le presentan.

Se ha dicho —adecuadamente— que la predicción es muy difícil, particularmente el futuro, pero a pesar de que no

podemos predecirlo, el peor error que podemos cometer es ignorarlo. El futuro tiene la mala costumbre de transformarse a sí mismo en presente, cogiendo a la población por sorpresa a través de todo tipo de acontecimientos desagradables, desde crisis financieras hasta grandes huracanes y tsunamis. Algunas veces se denomina a este tipo de acontecimientos como “actos de Dios”, pero no es culpa de Dios el que se nos coja tan a menudo desprevenidos. Lo que se necesita para hacer frente al futuro no son predicciones exactas. Las advertencias son suficientes.

En el presente, contamos con excelentes herramientas de predicción bajo la forma de modelos de base científica. A pesar de que el futuro sigue siendo imposible de predecir de con certeza, estos modelos todavía pueden proporcionarnos útiles advertencias. Desafortunadamente, a menudo elegimos ignorarlas cuando las consecuencias de afrontarlas no resultan amables. Es, en definitiva, el destino de Casandra, que trató en vano de advertir a sus compatriotas troyanos de un peligro inminente. Hoy en día utilizamos el ejemplo de Casandra en un sentido negativo, olvidando que ella estuvo en lo cierto. Podríamos denominar esta tendencia a ignorar las advertencias, “el efecto Casandra”.

Las advertencias que se recibieron en 1972 con LDC comenzaron a convertirse en algo cada vez más preocupante a medida que la realidad parecía seguir muy de cerca las curvas que los escenarios que LDC presentaron en su día. Varios acontecimientos recientes pueden verse como pistas amenazadores de que el colapso de la economía mundial, previsto por la mayoría de ellos, se encuentra a la vuelta de la esquina. Uno de estos acontecimientos lo constituye la subida de precios del petróleo, que alcanzó un pico de casi 150 dólares por barril en 2008. Este rápido incremento del precio llevó a que volvieran los miedos acerca del agotamiento de un recurso crucial para la sociedad industrial. De hecho, el crudo podría haber alcanzado en todo el mundo el máximo nivel de producción (pico del petróleo) en 2008 (Alekklett et al., 2010), tal y como se predijo algunos años antes (Campbell y Laherrere, 1998). Así pues, la Gran Recesión y la crisis de los

mercados financieros mundiales en 2008-2009 trajo consigo la progresiva creencia de que el gasto basado en el déficit ya no constituye el remedio adecuado, dada la incertidumbre existente de que el futuro crecimiento económico pueda asumir el pago de este.

Si lo que se está presenciando es una primera señal del colapso general de la economía por el hecho de haber ignorado los avisos recibidos en 1972, se han perdido casi 30 años que podrían haberse utilizado para su prevención. Pero quizá no es demasiado tarde para evitar este desastroso colapso, siempre y cuando se tomen las decisiones correctas y se utilicen las herramientas científicas para entender lo que el futuro nos depara. Puede ser el momento de revisar los argumentos de LDC y aprender de los errores anteriores.

Los autores del tercer libro de la serie LDC (Meadows et al., 2004) expusieron que su libro “es un modelo de lo que está en nuestras mentes y creándolo se ha alterado aquello que sabemos” (p. 121). Estas palabras son igualmente válidas para describir el presente libro, que únicamente puede ser un modelo de lo que se encuentra en la mente del autor, incluyendo el hecho de que ha alterado sus conocimientos. Teniendo en cuenta esta limitación, Los límites del crecimiento retomados constituye un intento de presentar todos los argumentos de LDC desde sus perspectivas científica e histórica. El libro describe cómo fueron utilizados los modelos en el estudio, así como los objetivos de los autores a la hora de manejarlos; revisa el debate que tuvo lugar tras su publicación mediante el examen de las objeciones y las críticas que se hicieron en su contra, especialmente por parte de los economistas. Se examinan en detalle dos puntos cruciales para la validez del enfoque de LDC: 1) ¿los recursos minerales son realmente finitos?, y 2) ¿la tecnología puede salvarnos del colapso y particularmente del agotamiento de los minerales? A continuación, Los límites del crecimiento retomados describe de qué manera LDC fue rechazado y demonizado y la forma en que está siendo sometido a una nueva evaluación que pone de relieve que el rechazo precoz que sufrió se basó en una lectura errónea del texto del estudio y en una mala comprensión de

sus propósitos. Finalmente, este libro ofrece un análisis de la relevancia del estudio hoy en día y de lo que todavía se puede aprender de él.

Este libro no está dirigido a especialistas en dinámica de sistemas e intenta presentar un panorama de la cuestión basado en conceptos relativamente sencillos y divulgativos. Se recogen algunos ejemplos del trabajo del autor sobre la modelización de sistemas económicos como la economía prepetrolera de captura de ballenas en el siglo XIX y la extracción de petróleo en el XX.

CAPÍTULO 2

LA HISTORIA DE ‘LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO’

El fin de la Segunda Guerra Mundial trajo consigo un periodo de gran prosperidad para el mundo occidental. Fue la época de las viviendas en la periferia, del contar con dos coches por familia, de la nevera en la cocina y de que viajar en avión dejara de ser un privilegio para los ricos. Fue el momento de los plásticos, los antibióticos, la televisión y de los primeros ordenadores. Fueron también los años de la exploración espacial; el primer satélite Sputnik fue lanzado en 1957 y solamente 12 años después, en 1969, el hombre pisó por primera vez la Luna.

Todo esto tenía lugar a la vez que un rápido incremento del uso de la energía y de las materias primas. A finales de la década de los sesenta el crudo se puso por delante del carbón como la fuente de energía más importante en el mundo. Los combustibles baratos obtenidos del petróleo generaron la realidad urbana que es visible en la mayor parte del mundo occidental: grandes áreas suburbanas habitadas por trabajadores que utilizan sus vehículos para desplazarse a los grandes centros urbanos.

El petróleo no constituía únicamente una fuente de combustible para los vehículos privados. Solo con la energía barata que provenía del petróleo, era posible generar el flujo de producto mineral indispensable para la industria moderna. El plástico se convierte en un producto básico, reemplazando a la madera y al textil natural. El acero, que había sido un caro distintivo del poder militar, se convirtió en barato y común para usos civiles. El aluminio pasó a ser un material habitual para todo tipo de aplicaciones, desde la cocina hasta la industria aeronáutica. La creciente industria de la alta tecnología podía hacerse con elementos singulares y exóticos a precios razonables para su aplicación en la electrónica, la industria aeroespacial, la química o la ingeniería. Finalmente, la “revolución verde” en la agricultura fue el resultado de la

combinación de la mecanización y los fertilizantes artificiales. Ambos fueron posibles gracias a un crudo barato y al gas natural. Fue el gran incremento en la productividad agrícola producido por la “revolución verde” lo que hizo posible alimentar a la creciente población mundial; una tendencia que llega hasta nuestros días.

Se sabía que el crudo y los combustibles fósiles en general eran un recurso finito, pero esto no afectó al optimismo general de la abrumadora mayoría de científicos, ingenieros, economistas y otros intelectuales. Ya en los años cincuenta se creyó que había nuevas formas de energía listas para ser utilizadas y que estas serían incluso más abundantes que la generada por los combustibles fósiles.

El primer reactor nuclear diseñado para la producción de electricidad entró en funcionamiento en EE UU en 1951. Fue el comienzo de lo que se vio como una rápida y necesaria expansión de reactores que proporcionarían a la humanidad una nueva era de prosperidad, mayor que la experimentada hasta el momento. Aunque se reconocía la finitud de los recursos minerales de uranio, existía la creencia de que esto se podía superar mediante el desarrollo de reactores “reproductores” y, eventualmente, mediante reactores de fusión que proveerían de una energía “demasiado barata para ser medida” (Strauss, 1954).

Con tanta prosperidad y un crecimiento que parecía imparable, algunas ideas extravagantes no parecían descabelladas. En la década de los años cincuenta se pensaba seriamente en la posibilidad de que existieran coches voladores, ropa de un solo uso, aviones atómicos y fines de semana en la Luna para toda la familia. ¿Y por qué no colonizar otros planetas? ¿Qué nos frenaba a la hora de explorar toda la galaxia? El crecimiento del progreso tecnológico había convencido a la mayor parte de la población de que el ingenio humano podía superar todos los problemas derivados de la limitación de los recursos.

Sin embargo, entre tanto optimismo, empezaba a aparecer una nueva conciencia. Si el mundo occidental estaba experimentando tal prosperidad, era fácil ver que el resto del

mundo se estaba quedando atrás. Esas regiones, que con optimismo se definían como “países en desarrollo”, no se estaban desarrollando en absoluto, lo cual era cierto incluso para algunas partes de los países más prósperos (Harrington, 1962). Es cierto que la “revolución verde” redujo la frecuencia de hambrunas en el mundo. Sin embargo, algo impidió que la prosperidad occidental se extendiese a las personas que ni siquiera podían soñar con dos vehículos por familia o con volar a Hawái de vacaciones.

¿Se trataba solo de una cuestión de tiempo? Quizá esperando lo suficiente, la magia del mercado libre llevaría a cabo el milagro de situar a cada persona en el camino del desarrollo. ¿O se trataba de una cuestión cultural? Quizá difundiendo las ideas occidentales, la cultura occidental y la forma de vida occidental, incluyendo la hamburguesa y los perritos calientes, todo el mundo aprendería cómo establecer un negocio y cómo estar preparado para la revolución industrial local.

Pero, quizá, el problema era distinto, quizá era erróneo el planteamiento de que la Tierra contaba con recursos naturales suficientes para proporcionar a cada persona el mismo estilo de vida que se había convertido en habitual en el mundo occidental. De esta forma, algunos comenzaron a tener claro que había límites al crecimiento humano en un planeta finito.

El concepto de los límites del crecimiento no era algo nuevo. Incluso en la Antigüedad, los periodos de crisis habían llevado a pensar en lo que hoy llamamos “sobrepoblación”. En los tiempos modernos el problema fue estudiado por Thomas Robert Malthus, quien publicó *An essay on the principle of population* (Ensayos sobre el principio de población), que contó con varias ediciones desde 1798 a 1826; un trabajo que permanece todavía hoy como un hito en la comprensión de los límites físicos a los que la humanidad se enfrenta. Pero Malthus fue un incomprendido incluso en su tiempo, pues Thomas Carlyle definió la economía como una “ciencia oscura” haciendo referencia al trabajo de Malthus. Tiempo después, Malthus fue acusado de cometer todo tipo de errores, en particular, de haber predicho una catástrofe que no tuvo lugar,

un destino común para todos aquellos que predecían un futuro no demasiado brillante. Pero Malthus no era “meramente un pronosticador del mal que estaba por venir” (McCleary, 1953). Más bien fue el primero en entender que las poblaciones biológicas tienden a crecer hasta llegar al límite que su entorno puede soportar. Malthus tenía una gran influencia en la biología; por ejemplo, tuvo influencia en el pensamiento de Darwin, así como en la economía. Los economistas clásicos de los siglos XVIII y XIX, Adam Smith, Ricardo, Mills, Jevons y otros, tenían una visión clara de los límites del sistema económico y adaptaron su pensamiento de acuerdo a ello.

La visión de los economistas clásicos se quedó anticuada cuando comenzó la gran carrera del optimismo en la segunda mitad del siglo XX. Pero incluso en medio de lo que quizá fue la fase del crecimiento económico de la historia de la humanidad con un ritmo más rápido, algunos se hacían una pregunta básica: ¿cuánto tiempo durará?

Los años que siguieron a la Segunda Guerra Mundial fueron, quizá, la primera vez en la historia en la que los límites físicos de nuestro planeta fueron claramente reconocibles para todos. Había pasado el tiempo en el que los mapas mostraban áreas en las que se indicaba *hic sunt leones*, “hay leones aquí”. Ya en 1953, Edmund Hillary y Tenzing Norgay habían escalado el monte Everest, la montaña más alta de la Tierra, uno de los últimos puntos de la superficie del planeta que se mantenían inexplorados por los humanos. En los sesenta, las fotos de la Tierra desde el espacio, traídas por los astronautas de la nave Apolo, mostraban imágenes de nuestro planeta como una bola azul y verde. Era finita, era limitada, todo el mundo pudo verlo. “Ningún hombre es una isla”, había dicho John Donne. Ahora era fácil comprender que todos vivíamos en una pequeña isla azul flotando en la negrura del espacio.

La idea de que todos los seres vivos son parte de la misma entidad se remonta a la década de los años veinte, cuando Vladimir Vernadsky acuñó el término “biosfera” (Weart, 2003). El concepto se hizo ampliamente conocido en los años sesenta cuando James Lovelock desarrolló el concepto de “Gaia”

(Lovelock, 1965), nombre que proviene de la antigua divinidad de la Tierra, con el fin de describir el ecosistema planetario. “Gaia” encarnaba el concepto de que todas las criaturas de la Tierra estaban unidas por un complejo sistema de retroalimentación que mantenía la temperatura del planeta a niveles tolerables para la vida.

En su momento, Gaia resultó ser muy diferente de la entidad benevolente que Lovelock había imaginado (Ward, 2009). Sin embargo, el concepto de Gaia supone una metáfora válida, incluso hoy en día, para la descripción del ecosistema planetario (Karnani y Annila, 2009). Dicho esto, si la vida es un organismo único y gigante, entonces ese organismo se encuentra atado por los límites de todo el planeta. Y si la generosidad del planeta es limitada, ¿cómo podríamos mantenerse para siempre el rápido crecimiento experimentado en los cincuenta y los sesenta?

En 1968, Garrett Hardin dio más en lo que pensar en relación con este problema con su artículo “The Tragedy of the Commons” (Hardin, 1968). Hardin describió un caso en el que el terreno es un bien común, el pasto es gratuito para todos los pastores. Cada pastor comprende que un exceso de animales daña la Tierra pero, a pesar de ello, tiende a aumentar el número de animales de su propio rebaño, dado que el beneficio individual es mayor que el perjuicio que le causa la pérdida colectiva. El resultado es el desastre: con demasiados animales pastando, el terreno fértil es destruido por la erosión y todo el mundo sufre las consecuencias de ello. Aun así, a pesar de que la situación es evidente para todos, sigue siendo conveniente para cada pastor sobreexplotar las parcelas de pasto restantes.

El modelo de Hardin es esquemático y seguramente el mundo real sea mucho más complejo que los hipotéticos pastos que describió. No obstante, con su análisis, Hardin cuestionó la esencia del concepto de “la mano invisible” que Adam Smith había desarrollado dos siglos antes. Mientras que los economistas neoclásicos consideraron que la búsqueda del propio interés llevaba a la obtención de máximo bien común,

Hardin consideró que esta búsqueda llevaba a la destrucción de los recursos que se estaban explotando.

Mientras que el modelo cualitativo de Hardin explicaba las razones de la sobreexplotación de los recursos naturales, en los años cincuenta, el geólogo americano Marion King Hubbert desarrolló un modelo empírico que describía lo rápido que se explotaban los recursos. Hubbert propuso que la curva de la producción del crudo en una región muy productiva debía tener “forma de campana”. Aplicando su modelo al petróleo en la zona continental de EE UU, en 1956 predijo que la producción máxima se debería haber alcanzado alrededor de 1970 y disminuiría después de aquello. Eso fue lo que ocurrió, se alcanzó el pico en 1971 (Campbell y Laherrere, 1998).

Hoy en día, la curva de producción con forma de campana se ha observado en muchos minerales además del petróleo (Bardi y Pagani, 2007) e incluso en otros recursos de renovación lenta no minerales (por ejemplo, este es el caso de las ballenas [Bardi, 2007b]). La curva con forma de campana se conoció también como “la curva de Hubbert”, donde el punto máximo se llamó “pico de Hubbert” (Deffeyes, 2001 y 2005). El pico de la producción mundial de petróleo es conocido como “pico del petróleo” (Campbell y Laherrere, 1998).

El del petróleo en EE UU no era el primer caso de un recurso mineral importante que había llegado a su pico de producción. Anteriormente, alrededor de 1920, la producción británica de carbón alcanzó su pico y luego comenzó a descender. Este y otros picos de producción históricos pasaron desapercibidos y, siempre que se analizaban, normalmente se atribuían a factores de mercado. Sin embargo, estos datos ponían de relieve que los recursos, incluso los más importantes, eran finitos y que la producción no podía continuar creciendo para siempre.

Otra preocupación de este tiempo era el crecimiento de la población mundial, un factor crucial del modelo de los “bienes comunes” de Hardin (1968). Hasta entonces, el crecimiento de la población se había visto como algo bueno, más gente significaba más soldados para el ejército, más contribuyentes

para el Estado, más campesinos para los terratenientes, más trabajadores para los propietarios de las fábricas. En definitiva, más riqueza para todo el mundo. Pero en los años cincuenta y sesenta, el crecimiento de la población había alcanzado una tendencia preocupante. A principios del siglo XIX la población humana había alcanzado los mil millones; en 1927 casi llegaba a los dos mil; la marca de los tres mil millones se alcanzó en los años sesenta. El crecimiento parecía seguir una curva exponencial, lo cual se convirtió en una pesadilla al extrapolar dicha tendencia a las décadas futuras. Las preocupaciones sobre la sobrepoblación se difundieron en un popular libro de Paul Ehrlich, *The Population Bomb* (1968) (La explosión demográfica), en el que el autor predecía la propagación de las hambrunas por todo el mundo.

Finalmente, la palabra “contaminación”, que resulta tan familiar, fue utilizada con el significado de “contaminación medioambiental” por primera vez en los años cincuenta. Inicialmente, el término se refería sobre todo a la basura radiactiva que se generaba en las explosiones nucleares, pero con el tiempo comenzaron a aparecer otras formas de contaminación. La “niebla tóxica” (smog), los gases resultantes de la combustión del carbón, se convirtió en una amenaza mortal. El episodio de niebla tóxica de Londres de 1952 fue especialmente mortal con cerca de 4.000 víctimas (Stegerman y Solow, 2002). Este acontecimiento llevó a la elaboración de una legislación en contra de la contaminación: la Ley del Aire Limpio (Clean Air Act), promulgada en Gran Bretaña en 1956, y la Ley de Control de la Contaminación del Aire (Air Pollution Control Act), promulgada en EE UU el mismo año. Más tarde, en 1963, fue aprobada otra parte más completa de la legislación federal de EE UU, la Ley de Aire Limpio.

La contaminación tomó muchas formas, a menudo inesperadas. Una fue el efecto de los pesticidas. En 1962, la bióloga americana Rachel Carson publicó su libro *Silent Spring* (Primavera silenciosa) (Carson, 1962), en el que se criticaba el uso indiscriminado de los pesticidas a los que denominó “biocidas”. La reivindicación de Carson puede calificarse, cuando menos, de revolucionaria. Hasta ese momento, era una

verdad evidente que los seres vivos podían dividirse entre “útiles” y “nocivos”, y que era algo bueno exterminar a esta última clase. El concepto de “ecosistema”, donde muchas especies interactúan entre sí, es más, se necesitan las unas a las otras, era relativamente nuevo en un mundo dominado por conceptos como “vivir mejor a través de la química”. Carson fue probablemente la primera autora en describir estas cuestiones en su famoso libro y la repercusión del mismo fue enorme. Se le considera, muy adecuadamente, la persona que comenzó lo que hoy llamamos el “movimiento ecologista”.

Esos años fueron, asimismo, testigos de los primeros indicios de que la actividad humana estaba creando una amenaza aún más preocupante para los seres humanos: el calentamiento global. En 1957, Robert Revelle y Hans Suess (Revelle y Suess, 1957) recopilaron algunos trabajos anteriores sobre el efecto de los gases invernadero y publicaron un estudio que demostraba cómo el crecimiento observado del dióxido de carbono resultante de las actividades humanas se traduciría en un aumento de las temperaturas del planeta. La prueba del calentamiento global no llegó a ser completamente clara hasta los años setenta pero, ya en los sesenta, era otro indicio preocupante del efecto de los humanos sobre los ecosistemas.

En los cincuenta y sesenta, las preocupaciones sobre la merma de los recursos, la sobrepoblación y la contaminación no constituían noticias de portada, pero iban poco a poco abriéndose camino a través de las conciencias de muchas personas preocupadas por el destino de la humanidad. Claramente, algo tenía que hacerse, pero no era suficiente con decirlo, algún día se tenía que llegar a un acuerdo sobre el medio ambiente. La cuestión era cuándo. ¿Teníamos milenios, siglos o quizá solo décadas? Y no solo eso: ¿cómo tendría lugar el choque de la humanidad contra los límites del planeta y qué síntomas podrían alertarnos y ayudarnos a prevenir las peores consecuencias? Existía una necesidad tremenda de comprender qué le deparaba el futuro a la humanidad.

Nunca se había acometido la labor de cuantificar este tipo de problemas globales, pero el progreso de la tecnología

comenzaba a facilitar las herramientas apropiadas para este propósito. En las décadas de los años cincuenta y sesenta, las computadoras digitales se estaban desarrollando rápidamente y se comenzaron a utilizar en muchas áreas de la ciencia como instrumentos de predicción del futuro.

A finales de los años cuarenta un joven profesor del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) de Boston, Jay Wright Forrester, había empezado a utilizar una nueva generación de computadoras digitales con el objeto de simular la interacción de los distintos elementos de la maquinaria y de los sistemas electrónicos. Forrester pasó posteriormente a interesarse por la gestión y la modelización de los sistemas económicos y denominó este nuevo campo como “dinámica industrial” (Forrester, 1958 y 1961), pero un tiempo más tarde, este término pasó a conocerse comúnmente como “dinámica de sistemas”. El método podía utilizarse para simular situaciones de negocio (Sterman, 2002) y sistemas socioeconómicos, como es el caso de ciudades enteras (Forrester, 1969; Madden, 1979; Burdekin, 1979). A partir de ahí, el siguiente paso estaba claro para Forrester: simular todo el sistema económico mundial. Desarrolló sus primeros modelos del mundo a mediados de los años sesenta, cuando los ordenadores se hicieron lo suficientemente potentes para llevar a cabo simulaciones que incluyeran los principales elementos de la economía mundial y del ecosistema.

Mientras Forrester estaba ocupado en estos estudios, otros estaban examinando el mismo problema. En 1968, Aurelio Peccei (1908-1985) y otros formaron el Club de Roma, un grupo de intelectuales de la industria y de la academia que se había reunido para estudiar y discutir cuestiones de índole económica y política. Al principio, el objetivo del Club no eran los límites del planeta. El documento titulado “The Predicament of Mankind” (Club de Roma, 1970) pone de relieve que la principal preocupación del Club en aquel momento la constituía el hecho de encontrar métodos prácticos para mejorar las condiciones de vida de los seres humanos, en particular, mediante la reducción de la desigualdad en la distribución de la riqueza. Pero los

miembros del Club rápidamente llegaron a la conclusión de que tenían que encontrar formas de cuantificar los límites de los recursos mundiales si querían ser capaces de actuar de acuerdo con sus preocupaciones. En 1968, Aurelio Peccei conoció a Jay Forrester en una conferencia sobre problemas urbanos en Italia, a orillas del lago Como (Forrester, 1992). Aquel encuentro fue la chispa que inició la serie de acontecimientos que dieron lugar al estudio de Los límites del crecimiento.

Peccei estaba impresionado por las ideas de Forrester y le invitó a participar en la reunión que el Club de Roma organizó en Berna en 1970. En aquella reunión, Forrester persuadió a los miembros del comité ejecutivo del Club de que viajaran al MIT en Boston para estudiar la posibilidad de utilizar la dinámica de sistemas para sus propósitos. Se dice que Forrester anotó los elementos básicos de su modelo del mundo mientras volaba de vuelta a Boston.

Allí, los miembros del Club de Roma analizaron el tema con Forrester y también con uno de sus colegas, Dennis Meadows, que tenía entonces 28 años. Aparentemente, Meadows era el único de su grupo que todavía no estaba metido en otros proyectos, así que escribió una memoria de varias páginas en la que exponía cómo un proyecto de modelización del mundo basado en la dinámica de sistemas podía ejecutarse, y los miembros del Club decidieron tratar de utilizarlo. Más tarde, Meadows, siguiendo las recomendaciones de Peccei, solicitó a la fundación Volkswagen una subvención para el estudio (Meadows, nota personal, 2010). La propuesta fue aceptada y Meadows reunió un grupo de 16 investigadores para trabajar en el proyecto. El quipo lo componían la mujer de Dennis Meadows, Donella Meadows, Jorgen Randers, William Behrens, entre otros.

En 1971, Forrester publicó los resultados de su trabajo sobre la modelización del mundo en un libro que tituló *World Dynamics* (Forrester, 1971). El trabajo del equipo liderado por Dennis Meadows se publicó en 1972 en un libro titulado *Los límites del crecimiento* (LDC) (Meadows et al., 1972).

Forrester y el equipo de LDC trabajaron cada uno de manera independiente pero llegaron a la misma impactante conclusión, que puede resumirse en: “La economía mundial tiende a estancar su crecimiento y a colapsarse como resultado de una combinación de la reducción en la disponibilidad de los recursos, la sobrepoblación y la contaminación”. Esta conclusión era una característica “sólida” de las simulaciones, esto es, cambió poco al variar los supuestos iniciales.

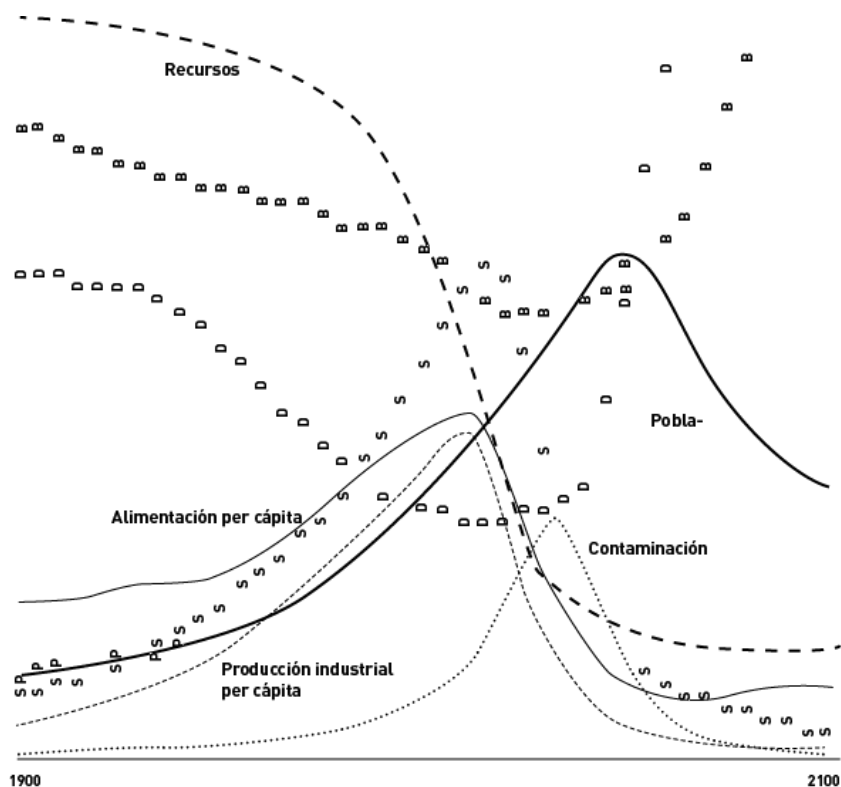
Ni los cálculos de Forrester ni los de LDC se concibieron para determinar exactamente cuándo comenzaría el colapso pero, utilizando los mejores datos disponibles, ambos estudios indicaban que el comienzo del declive económico podía esperarse dentro de las primeras décadas del siglo XXI, es decir, en 30 o 40 años. En el estudio de LDC, este escenario se conoce como el “caso base” o el “funcionamiento estándar” (gráfico 1).

Tanto Forrester como el equipo de LDC llevaron a cabo sus simulaciones en una variedad de supuestos posibles, incluidas las innovaciones tecnológicas radicales o que la población pudiera estabilizarse mediante políticas a escala global. En la mayor parte de los casos, incluso para los supuestos más optimistas sobre la disponibilidad de los recursos y el progreso tecnológico, el colapso no se podía evitar y, en el mejor de los casos, solamente se podía retrasar. Solo una cuidadosa elección de un conjunto de políticas mundiales diseñada para frenar el crecimiento de la población y estabilizar el consumo de materias podría evitar el colapso y llevar a la economía mundial a una estado estacionario, siempre y cuando se mantuviera el consumo de materias igual al de la década de los setenta.

Gráfico 1

Resultado de las simulaciones realizadas para el modelo del ‘caso base’ de la edición de 1972 de ‘Los límites del

crecimiento'. El modelo del 'caso base' es el que asume como parámetros de entrada los valores que más se acercan a los datos disponibles



Fuente: Dennis Meadows.

Los dos libros que describen estos conceptos, *World Dynamics* y *LDC*, tuvieron un éxito considerable. Del libro de Forrester se vendieron cerca de 100.000 copias, un dato relevante tratándose de un libro concebido como un texto técnico lleno de ecuaciones y diagramas. Pero el verdadero impacto se dio con el estudio de *LDC*, que se dirigió desde el principio al público general.

El número total de copias vendidas de LDC no se conoce con certeza. Sin embargo, los autores del estudio (Meadows, nota personal, 2010) estimaron que la venta total superó el millón. Este libro, además, se tradujo a más 30 idiomas. Evidentemente, el libro puso voz a un profundo sentimiento de carácter mundial: que los límites de los recursos planetarios no se podían ignorar durante mucho tiempo más.

A pesar del éxito y del interés que despertaron, tanto el libro de Forrester como el del equipo de LDC se enfrentaron a fuertes críticas. Los economistas, por ejemplo, parece que se unieron a la hora de rechazar los métodos y los hallazgos de estos estudios, considerándolos incompatibles con la economía, tal y como se concebía esta en aquel momento. Pero el debate que resultaba más encendido era en el ámbito político. En este caso, el éxito de LDC generó una fuerte reacción.

Los comentarios de Giorgio Nebbia (1997) y Mauricio Schoijet (1999) nos muestran cómo las diferentes actitudes políticas dieron forma a la reacción mundial a LDC. En la Unión Soviética la reacción venía porque el libro parecía describir bien el colapso que le esperaba al capitalismo, pero nada tenía que ver con las sociedades comunistas, que evitarían el colapso a través de sus economías planificadas. En muchos países pobres, los intelectuales locales a menudo veían LDC como un intento de perpetuar la dominación del rico Occidente, un fraude para imponer reducciones de población a los más pobres o incluso el presagio del retorno del colonialismo. En el mundo occidental, diferentes orientaciones políticas dictaron con frecuencia las reacciones a LDC. En muchos casos, la izquierda y la derecha se unían en ese rechazo. La izquierda a menudo veía LDC como un intento de justificar la posición subordinada de la clase trabajadora, mientras que la derecha lo percibía como una amenaza a su visión del libre mercado y del crecimiento económico. Las reacciones positivas a LDC vinieron en su mayoría de las posiciones moderadas y liberales, que no solo veían las amenazas descritas en los escenarios de LDC como reales, sino también las oportunidades de reducir las desigualdad y de crear un mundo libre (véase, por ejemplo,

Peccei e Ikeda, 1984).

Si, al principio, el debate sobre LDC parecía encontrarse equilibrado, gradualmente la actitud general sobre el estudio pasó a ser más negativa. Se inclinó decisivamente en contra del estudio cuando, en 1989, Ronald Bailey publicó un artículo en Forbes en el que acusaba a los autores de haber predicho que la economía mundial debía haber agotado ya en ese momento algunos insumos minerales vitales cuando, obviamente, eso no había sucedido.

La declaración de Bailey fue solo el resultado de una lectura equivocada de los datos de una sola de las tablas de la edición de 1972 de LDC. En realidad, ninguno de los múltiples escenarios que se presentaban en el libro mostraba que el mundo agotaría ninguno de los insumos minerales vitales antes del final del siglo XX y ni siquiera antes del XXI. A pesar de ello, el concepto de “los errores del Club de Roma” alcanzó una gran popularidad. Con la llegada de la década de los noventa, se convirtió en algo común afirmar que LDC había sido un error, si no una broma, para mofarse del público, o incluso un intento de someter a la humanidad a una dictadura planetaria, tal y como se había afirmado en algunas opiniones anteriores (Golub y Townsend, 1977; Larouche, 1983). Al final del siglo XX, la victoria de los críticos de LDC parecía ser completa, pero, en realidad, el debate estaba lejos de resolverse.

El interés por LDC y, en general, por la modelización del mundo parece haber vuelto hoy, dado que el colapso predicho en todos los escenarios de LDC podría comenzar a manifestarse en términos de la colisión de los mercados y la crisis económica. Con el nuevo siglo, se está apreciando una creciente comprensión de que necesitamos nuevas ideas y enfoques para hacer frente a los graves problemas económicos y ambientales, desde el agotamiento de los recursos hasta el cambio climático global.

Hoy se puede mirar atrás, hacia los casi 40 años de la historia de Los límites del crecimiento, y repasar el mensaje recibido en 1972. Lo que constituyó el futuro en ese momento es ahora el

pasado y se puede reconocer la validez de los escenarios presentados en el libro (Turner, 2008; Hall y Day, 2009), ya que los sistemas económicos mundiales, hasta ahora, han resultado seguir muy de cerca el escenario del “caso base”. De esta forma, se puede decir que el libro de LDC nunca “se equivocó”, en el sentido en el que lo que pensaban los críticos. Estos habían malinterpretado, olvidado o ignorado que la escala temporal en el escenario del “caso base” era tal que el colapso no se esperaba hasta aproximadamente algún momento de las dos primeras décadas del siglo XXI.

Existe igualmente un factor más profundo en la malinterpretación del mensaje de LDC: este suponía una advertencia, no una predicción, y como tal, no podía ser “incorrecta”. No importa si el colapso tiene lugar o no en una fecha específica que se corresponda con un escenario determinado de los presentados en el libro. Lo que importa es que al ignorar este estudio durante las cuatro últimas décadas, probablemente se ha perdido la posibilidad de hacer algo para evitar o por lo menos mitigar los problemas en el futuro.

A pesar de ello, la historia de Los límites del crecimiento es una historia que continúa, se puede aprender mucho aún del estudio de 1972 y de sus versiones más recientes (Meadows et al., 1992 y 2004), así que no es demasiado tarde para poner en práctica algunos de los métodos y recomendaciones que se derivan del mismo.

CAPÍTULO 3

SOBRE MODELOS Y SIMULACIONES

La ciencia consiste sobre todo en hacer predicciones. Se realizan mediciones y construyen modelos (también llamados “teorías” o “leyes”) para dar sentido a lo que sucede en el entorno y afrontar el futuro mejor preparados. Desde el punto de vista de su finalidad última, la ciencia no ha variado mucho desde los tiempos de los antiguos oráculos, aunque, por supuesto, hoy en día estamos orgullosos de definir parte de la ciencia como “exacta”.

Uno de los primeros problemas que surgieron en el debate acerca de LDC fue comprender exactamente cuál era su propósito de estudio. La insistencia de los autores por explicar que los resultados del mismo no eran “predicciones” generó aún más confusión. Algunas personas se preguntaron que si no se trataba de predicciones, cuál era entonces la utilidad del informe. Otras interpretaron los resultados del documento como pronósticos, casi como profecías, y tendieron a seleccionar aquellos escenarios que, o bien les gustaban y entonces alababan el estudio, o bien les desagradaban y por tanto lo criticaban.

Así, para comprender la relevancia de LDC será necesario entender primero qué tipo de sistemas pretende configurar, con qué propósito y expectativas. Los modelos “solo pueden hacerse y juzgarse con arreglo a un propósito” (Meadows et al., 1982). A esto se refiere el este capítulo.

El diseño de modelos es un arte que viene de antiguo y los primeros modelos de sistemas complejos pueden remontarse a los tiempos del estratega chino Sun Tzu, quien escribió en El arte de la guerra (ca. 400 BCE Project Gutenberg, 2010):

Si las estimaciones realizadas antes de la batalla indican victoria es porque los cálculos cuidadosamente realizados

muestran que tus condiciones son más favorables que las condiciones del enemigo; si indican derrota, es porque muestran que las condiciones favorables para la batalla son menores. Con una evaluación cuidadosa, uno puede vencer; sin ella, no puede. Muchas menos oportunidades de victoria tendrá aquel que no realiza cálculos en absoluto.

1

Se asume que con el término “cálculos” Sun Tzu hacía referencia a que los planes militares debían realizar predicciones cuantitativas sobre el futuro. Probablemente sería algo similar a lo que hoy se conoce como “simulaciones militares” o “juegos de guerra”.

No es algo casual que los primeros ejemplos de modelización en la historia aparecieran en el ámbito militar. La guerra es una actividad difícil y compleja, cargada de incertidumbres y peligro, y su resultado final depende sobre todo de las decisiones tomadas durante la evolución del sistema. Modelizar un sistema así es extremadamente difícil: ¡si fuera posible predecir exactamente el resultado de una guerra, sería inútil enfrascarse en ella!

Sin embargo, siempre es posible cierto grado de predicción, incluso para las guerras y las batallas. En estos casos, por supuesto, cualquier pequeña predicción es siempre mejor que ninguna. Aunque esto se aplica al caso de las simulaciones militares, tiene validez general en todo el ámbito de la modelización. Según la definición dada por Hall y Day (1977), “los modelos son la formalización de nuestras hipótesis sobre un sistema”. Las hipótesis, obviamente, pueden ser erróneas y, en este caso, el propósito del modelo sería mostrar los fallos cometidos. En cualquier caso, los modelos permiten hacer referencia explícita a cómo se cree que las cosas funcionan y a cómo aplicar un método científico a asuntos complejos.

En general, los modelos pueden ser puramente cualitativos, basados únicamente en la intuición y la experiencia. Pero

también pueden ser cuantitativos, fundamentados en expresiones matemáticas que definen la relación entre los diferentes elementos de un sistema. Para los modelos cuantitativos, “ejecutar una simulación” significa que las ecuaciones del modelo deben resolverse escalonadamente en función del tiempo, normalmente utilizando un ordenador. Este método proporciona una descripción de cómo los parámetros de un sistema varían con el tiempo. Cuando una simulación captura solo uno de todos los posibles resultados, se suele utilizar el término “escenario”.

Los sistemas que pueden ser modelizados han sido clasificados de varias formas (Ackoff, 1971; Lewis, 2002) en función de su estructura, propósito, organización, etc. Desde un punto de vista más amplio, los sistemas se pueden dividir en dos categorías: lineales y no lineales. Aunque no corresponde a este capítulo el adentrarse en la definición exacta de ambos términos, se puede decir que los sistemas lineales pertenecen al ámbito de la física tradicional y la ingeniería, mientras que los sistemas no lineales suelen ser objeto de estudio de la biología, la sociología y la economía.

Los sistemas lineales se caracterizan por incluir relaciones causa-efecto bien definidas y tener un comportamiento predecible y repetitivo en el tiempo. Un buen ejemplo puede ser un reloj mecánico, cuyas ruedas dentadas interactúan entre sí con un patrón predecible.

Se han obtenido notables éxitos en la comprensión y predicción del comportamiento de estos sistemas, aunque, obviamente, existen límites a la exactitud con la que este puede predecirse. Por ejemplo, la trayectoria de un proyectil puede resultar alterada por determinados efectos, como la velocidad del aire, que no puede ser determinada con exactitud antes del disparo. Sin embargo, un cuerpo volador en un campo gravitatorio es un ejemplo de sistema lineal donde, en general, es posible realizar una predicción más aproximada que puede mejorarse mediante el uso de sofisticados métodos de cálculo y mejores estimaciones.

La segunda categoría de sistemas es la de los no lineales. Estos

sistemas generalmente incluyen varios cuerpos o elementos que interactúan entre sí. Muestran características típicas; en particular, su evolución en el tiempo es a menudo muy difícil, o imposible, de predecir en un espacio temporal amplio. Tampoco muestran una relación causa-efecto bien definida.

La “no linealidad” es un elemento fundamental de la categoría de sistemas conocidos como “complejos”. En este contexto, el término “complejo” no significa simplemente complicado, en el sentido de que el sistema está formado por varios elementos o subsistemas. Significa que los elementos del sistema están enlazados entre sí de una manera que normalmente incluye una relación de retroalimentación. De manera general, se puede decir que la retroalimentación significa que el comportamiento del sistema está determinado por su propio historial. Pero en el ámbito de los sistemas no lineales, la retroalimentación supone que los elementos de dicho sistema reaccionan ante una perturbación, bien aumentándola o disminuyéndola en función de si esa retroalimentación es positiva o negativa. En este caso, ni “positivo” ni “negativo” tienen un significado normativo intrínseco (de bien o mal). Este matiz resulta en ocasiones de difícil comprensión, por lo que ambos términos suelen ser sustituidos por retroalimentación de “refuerzo” y retroalimentación “estabilizadora” o “de equilibrio”. Las perturbaciones externas habitualmente se denominan forcings. Un forcing normalmente produce una cascada de retroalimentaciones dentro del sistema que puede conducir a una fuerte amplificación, o disminución, de la propia perturbación.

Los sistemas complejos, los interactivos y los no lineales muestran a menudo un conjunto de características propias que han sido descritas por Sternam (2010) como:

Dinámicas.

Estrechamente vinculadas.

Regidas por una retroalimentación.

No lineales.

Autocoordinadas.

Flexibles.

Evolutivas.

Esta lista puede dar una idea de la fascinación que produce el estudio de estos sistemas y de la dificultad de hacer predicciones precisas acerca de su comportamiento.

El regulador de una máquina de vapor es un sistema simple con retroalimentación que fue descrito por primera vez en términos matemáticos por James Clerk Maxwell (1868). Es un claro ejemplo de una retroalimentación (estabilizadora) negativa. Cuando una fuerza externa provoca un aumento de la velocidad del motor, el regulador reduce los flujos de vapor hacia el motor, ralentizándolo. Lo contrario sucede ante un descenso de la velocidad. Estas retroalimentaciones estabilizadoras mantienen el motor a una velocidad constante. El sistema muestra una propiedad llamada “homeostasis”, es decir, la tendencia de mantener los parámetros constantes u oscilando entre valores constantes. Se trata de una propiedad típica de los sistemas complejos donde intervienen retroalimentaciones compensadoras (Karnani y Annila, 2008).

Un ejemplo más complejo de un sistema dominado por una retroalimentación es el de la atmósfera terrestre, que incluye además retroalimentación estabilizadora y de refuerzo. En circunstancias normales, la temperatura de la Tierra se mantiene en condiciones homeostáticas y, más allá de los ciclos estacionales, sufre muy pocos cambios. Pero las emisiones de CO₂ generadas por la actividad humana son una perturbación que desequilibra los flujos de radiación solar mediante el llamado “efecto invernadero”. El aumento en la concentración de CO₂ debería provocar un calentamiento global, pero el sistema climático reacciona ante esta perturbación con una serie de retroalimentaciones positivas y

negativas (de refuerzo y estabilizadoras) que pueden ampliar o reducir dicha perturbación.

Las plantas son un ejemplo de retroalimentación estabilizadora, pues crecen si hay más presencia de CO₂ en la atmósfera, estabilizando su concentración. Por el contrario, un ejemplo de retroalimentación de refuerzo es el cambio en la extensión de los glaciares, que afecta al albedo del planeta. Con el aumento de la temperatura, los glaciares tienden a disminuir su superficie, lo que provoca una reducción del albedo del planeta, lo que provoca a su vez un mayor aumento de las temperaturas. El sistema climático de la Tierra es una maraña de retroalimentaciones que podrá finalmente desenredarse mediante las perturbaciones impuestas por las emisiones de CO₂. El resultado será lo que Robert Luis Stevenson denominó “un banquete de consecuencias” (Sterman, 2010), que probablemente no sean nada agradables para los seres humanos (Hansen, 2007). El hecho de que se sigan emitiendo gases de efecto invernadero, pese al peligro que suponen, demuestra lo difícil que resulta pronosticar el comportamiento de los sistemas no lineales y cómo la mayoría de las personas tiene problemas a la hora de comprender las consecuencias de las acciones provocadas por semejantes sistemas.

Algunos sistemas no lineales muestran un grado más de complicación, convirtiéndose en “caóticos” (es decir, nunca repitiendo la misma trayectoria en el tiempo) o mostrando lo que se conoce como self-organized criticality (SOC) (Bak, 1996). Los sistemas SOC pueden describirse por medio de “leyes de potencia” que enlazan la intensidad de ciertos eventos con su frecuencia en el tiempo.

Cuando un sistema se convierte en caótico o se encuentra en un estado SOC puede resultar “determinista”, en el sentido de que se ha generado por ecuaciones aparentemente simples, pero predecir exactamente su comportamiento es muy difícil. Incluso una ecuación logística sencilla, $x(t+1) = kx(t)(1 - x(t))$, se convierte en caótica e impredecible para algunos valores de k . Esta ecuación es conocida en el ámbito de la

ecología como la “ecuación May”.

En todo caso, el hecho de que un sistema esté dominado por los efectos de la retroalimentación, o incluso que sea caótico o esté en continua evolución, no implica que sea totalmente desconocido. Por el contrario, estos sistemas a menudo siguen patrones bien definidos. Pensemos en un sistema biológico: evidentemente, es imposible formular una ecuación basada en las leyes de Newton que permita describir el movimiento de un gato. Pero el comportamiento de un gato no es absolutamente impredecible: basta con agitar la caja de pienso y ver qué sucede.

A menudo se habla de estos sistemas en términos de “atractores”, una serie de parámetros que el sistema tiende a alcanzar. En algunos casos, el sistema alcanzará esos parámetros y se resolverá². En otros casos el sistema “orbitará” sobre uno o más atractores, sin llegar a alcanzar ninguno jamás. En los sistemas caóticos, las órbitas nunca repetirán las trayectorias previas y, en este caso, los atractores se llamarán “atractores extraños”. Un ejemplo clásico de atractor extraño es el relativo al llamado “efecto mariposa”. El término, que tiene su origen en el trabajo del meteorólogo Edward Lorenz (1963), ha sido asumido por la cultura popular, como en la película Parque Jurásico de 1993. Aunque averiguar si tales efectos son de hecho operativos sería otra pregunta a responder, el efecto mariposa es un concepto muy adecuado para ilustrar el hecho de que los sistemas no lineales y complejos no muestran una relación causa-efecto bien definida. La mariposa no “provoca” un huracán, es solo el detonante que desencadena la serie de acontecimientos que conducen a él.

Así, predecir el comportamiento de los sistemas complejos no lineales es mucho más difícil que hacerlo de los lineales. En cualquier caso, un pequeño grado de predicción es posible, siempre y cuando no se pretenda conseguir a la vez predicciones exactas y a largo plazo. El pronóstico meteorológico es un ejemplo de predicción a corto plazo de un sistema no lineal. En este caso, el modelo y el sistema real

divergirán rápidamente con el paso del tiempo, sin importar el grado de sofisticación de los modelos utilizados o qué alcance se le supone a la base de datos. Los pronósticos meteorológicos, como todos sabemos, son válidos como mucho para unos pocos días. Sin embargo, serán todavía útiles durante un periodo corto de tiempo.

Por el contrario, las predicciones a largo plazo pertenecen a la categoría de modelización climática. Este tipo de pronósticos está relacionado con la determinación de los atractores del sistema. No necesitamos modelos matemáticos para saber que cualquier día de agosto será generalmente más cálido que uno de enero. Pero, por supuesto, en enero no podemos predecir con exactitud cómo de caluroso será un día del mes de agosto siguiente. Los modelos climáticos detallados se utilizan para predicciones de tendencias de largo alcance (IPCC, 2007) y tienen una larga historia (Richardson, 1922; Ashford, 1985). A pesar de su sofisticación, estos modelos no son capaces de decir si mañana lloverá o no. Así, como regla general, con relación a la habilidad predictiva de estos sistemas, se deberá elegir entre alcance o precisión.

Llegados a este punto, es posible comprender el tipo de sistemas que modelizaba el estudio de LDC. El sistema económico mundial es un sistema complejo, no lineal y dominado por retroalimentaciones. Es imposible realizar predicciones detalladas de varias décadas o incluso años. Sin embargo, todavía es factible comprender el comportamiento del sistema en estos plazos. El sistema mundial que se desarrolla en el estudio de LDC no muestra un comportamiento caótico y no es cíclico (aunque podría serlo en un rango de tiempo mayor al examinado). Por tanto, no podemos definir atractores para este sistema. En cualquier caso, es posible modelizar su comportamiento para una amplia gama de supuestos iniciales y determinar qué características pueden definirse como “robustas”, esto es, que no dependen, o dependen vagamente, de los parámetros de entrada o de fuerzas externas. Como ya se ha mencionado anteriormente, para los casos de LDC y World Dynamics, se puede determinar que el colapso de la economía mundial es una característica robusta de este modelo.

Estos modelos mundiales son, por tanto, análogos en ámbito y

enfoque a los estudios climáticos recientes (IPCC, 2007), donde los resultados de las simulaciones se consignarán en términos de varias posibilidades que dependen de suposiciones iniciales. Ninguno de los escenarios climáticos estudiados en los informes del IPCC es una “predicción”, pero, tomados en conjunto, muestran que el calentamiento es una característica robusta del sistema que se está modelizando. En cualquier caso, al igual que sucede con los modelos de LDC, los modelos climáticos han sido malinterpretados y difamados, con la incertidumbre inherente que es parte de la construcción de escenarios que se toma como una debilidad de todo el concepto de “calentamiento global”.

A partir de estas consideraciones, se puede hacer un listado de los usos que pueden darse a los modelos y simulaciones, con especial referencia a los sistemas no lineales y complejos:

1. Predicción. Los modelos, incluso los complejos y no lineales, tienen un cierto valor de predicción. Por supuesto, todas las predicciones deben tomarse con cautela. La mayoría de las simulaciones dependen de un gran número de parámetros de entrada y cada parámetro tiene una incertidumbre específica asociada a su valor. Las incertidumbres también existen con respecto a las relaciones que describen el modelo. Además, los resultados de la simulación normalmente se verán afectados por las decisiones tomadas mientras el sistema evoluciona (es bien sabido que ningún plan de batalla sobrevive al contacto con el enemigo). Debido a estas incertidumbres, las predicciones obtenidas utilizando simulaciones se deben considerar siempre aproximadas. Sin embargo, incluso dentro de estos límites, las predicciones no son inútiles. Por ejemplo, en la mayoría de los casos, una simulación militar generará la victoria del lado más fuerte, lo que confirma la afirmación de Napoleón de que Dios lucha en el bando con la mejor artillería.

2. Exploración. Este concepto se refiere al hecho de poner en marcha un “abanico” de escenarios que cubran la mayoría de

posibilidades razonables para que el futuro pueda manifestarse por sí mismo. Se trata de un enfoque militar típico, consistente en disponer de toda la gama de resultados estratégicos posibles, que se desplegarán en función de las decisiones tomadas por ambos bandos. Por supuesto, este tipo de enfoque no se limita a las simulaciones militares y puede ser aplicado a todo tipo de sistemas: en los negocios, la economía, la planificación urbana y muchos otros. La exploración de las posibles opciones es el primer paso para controlar un sistema.

3. Entrenamiento. Este es un uso típico de las simulaciones, tanto militares como de otro tipo. La realización de simulaciones permite a los responsables del control del sistema familiarizarse con su trabajo y con cómo sus acciones afectan el comportamiento del sistema.

4. Preparación y planificación. Este uso de los modelos consiste en hacer un uso real de los resultados de las simulaciones para prepararse para el futuro. En una simulación estratégica puede consistir en el despliegue de unidades militares, de tal manera que permita optimizar la respuesta a las diferentes acciones posibles del enemigo. La misma estrategia se puede utilizar en los negocios o para hacer frente a los problemas de contaminación como el cambio climático. Nunca se puede saber exactamente lo que el futuro tiene reservado, pero se puede estar preparado para ello.

Esto es lo que son los modelos y las simulaciones, pero merece la pena también hacer una lista de lo que no son. Las simulaciones no son, por ejemplo, “solo un juego”, a pesar del hecho de que las simulaciones militares se denominen “juegos de guerra”. Puede ser que el término “juego” parezca negativo, pero se ha demostrado una y otra vez que los juegos de guerra son una herramienta militar fundamental (Caffrey, 2000).

Además, los modelos y las simulaciones no tienen nada que ver con la denominada “magia empática”, esto es, la idea de que lo que se hace a una representación de algo afectará a lo representado. Por ejemplo, dentro del paradigma de la magia empática, el hecho de clavar alfileres en un muñeco que se parece a alguien (el “modelo”) se supone que le provoca dolor o enfermedad a ese alguien. Sobra decir que este no es el modo en que trabajan los modelos y simulaciones por ordenador. Sin embargo, muchas personas parecen creer que el resultado de una simulación afecta al comportamiento del mundo real.

Las simulaciones son modelos matemáticos, ecuaciones que generan los números y gráficos mostrados en una pantalla de ordenador. Las simulaciones describen situaciones que podemos reconocer como posibles resultados de un sistema de un mundo real. Eso es todo. Las simulaciones pueden ser más o menos útiles, pero no pueden ser, en sentido estricto, “correctas” o incorrectas”.

Sin embargo, la actitud emocional de las personas hará que vean las simulaciones exactamente en esos términos, produciéndoles felicidad o enfado en función de los resultados de dicha simulación. Este es uno de los problemas con los que el estudio de LDC se encontró: muchas personas mostraron su malestar al entender que el estudio estaba prediciendo una catástrofe o, peor aún, era un pedazo de “magia empática” que provocaría esa catástrofe (Marxsen, 2003).

Se necesita un poco de esfuerzo para liberarse de este tipo de percepciones parciales. Una vez que se hace, es posible beneficiarse de los modelos y simulaciones como una herramienta útil, de hecho indispensable, que permite estar preparado para el futuro.

Notas

1. [N. del T.] Texto extraído de la edición española del libro El arte

de la guerra, capítulo I, Edaf.

2. La caja de pienso puede definirse como un “atractor” para el gato, aunque no incluye la misma definición formal del “atractor” que la teoría del caos.

CAPÍTULO 4

la modelización de LA DINÁMICA DE SISTEMAS

La dinámica de sistemas tuvo un comienzo ajetreado. Jay Wright Forrester, quien la desarrolló en la década de los cincuenta, comenzó su carrera con el estudio de servosistemas para cañones antiaéreos automáticos. Este interés le llevó a viajar hasta el área de operaciones del ejército de Estados Unidos en el océano Pacífico durante la Segunda Guerra Mundial para reparar un sistema de radar automático instalado en el portaviones Lexington, que fue torpedeado por los japoneses mientras Forrester se encontraba a bordo.

Después de la guerra, Forrester continuó trabajando en servosistemas en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, en Boston. Allí dirigió un equipo que desarrolló una memoria magnética que se convirtió en el estándar para los ordenadores de la década de los cincuenta (Forrester, 1951). Forrester pronto incorporó los nuevos ordenadores al estudio de los sistemas no lineales y, en 1956, se trasladó a la Sloan School of Management del MIT, donde comenzó a trabajar en la aplicación de estos métodos a los sistemas sociales y económicos. Con el tiempo, desarrolló el conjunto de herramientas y conceptos que hoy se conoce como “dinámica de sistemas” (Forrester, 1992).

La dinámica de sistemas es una manera de modelizar cualquier tipo de sistemas, pero está especialmente pensada para ser aplicada a sistemas no lineales y complejos. El término “dinámica” puede significar simplemente que “depende del tiempo”, pero fue elegido por Forrester (1992) para destacar que estos modelos no solo tienen por objeto crear una instantánea del sistema que se está modelizando, sino describir su evolución en el tiempo.

Los modelos de la dinámica de sistemas tienen en cuenta una serie de elementos fundamentales, principalmente los stocks, los flujos y la retroalimentación. Un stock es una cantidad de

algo; por ejemplo, puede ser el número de personas de una población. El flujo, en cambio, es la variación de la existencia en el tiempo; por ejemplo, en un sistema biológico puede ser el incremento (o disminución) de una población. Los flujos y los stocks están relacionados entre sí: el tamaño de una población siempre variará en función de los flujos entrantes y salientes, mientras que la intensidad de los flujos a menudo dependerá del tamaño de los stocks a los que está conectado. Cuando la intensidad del flujo en un stock depende del tamaño del propio stock, estamos ante una definición práctica de retroalimentación. En este caso, el stock y el flujo se influyen mutuamente, reforzando o amortiguando el crecimiento o la disminución del stock. La retroalimentación positiva se define como el refuerzo del proceso, mientras que la retroalimentación negativa se define como una restricción del proceso. Los términos equivalentes “retroalimentación de refuerzo” y “retroalimentación estabilizadora” también se utilizan.

La dinámica de sistemas es una forma de cuantificar estos factores con el fin de describir el comportamiento de los sistemas complejos. Como se mencionó antes, un sistema complejo no tiene por qué ser muy complicado, así que se puede empezar con un ejemplo sencillo para describir cómo funciona la dinámica de sistemas en la práctica.

Un modelo sencillo que incluye retroalimentaciones negativas y positivas es el hoy conocido como “Lotka-Volterra” (LV) (Lotka, 1925; Volterra, 1926). Este modelo también se conoce como el modelo “depredador-presa” y, a veces, como el modelo “lobos y conejos” o “zorros y conejos”. El modelo LV es una simplificación extrema de un sistema biológico real y se ha demostrado que no es válido para describir poblaciones biológicas reales (Hall, 1988). No obstante, se puede considerar como modelos intelectuales (mind sized model [Papert, 1980]) útiles para entender las principales características de los modelos dinámicos más complejos.

La terminología usada en la dinámica de sistemas define los dos stocks del modelo LV como la población de la presa y la del

depredador. El primero será definido como R (la presa) y el segundo como C (el depredador) (más adelante, cuando sea aplicado el modelo a los sistemas económicos, este stock será denominado “capital”). R' será la variación (el flujo) de R, y C' la de C. A partir de esta pequeña explicación, el modelo LV puede escribirse en dos ecuaciones diferenciales vinculadas, donde ks representa coeficientes positivos que han de adaptarse al sistema específico que se está modelizando.

$$R' = -k_1CR + k_2R$$

$$C' = k_3CR - k_4C$$

Obsérvese cómo estas ecuaciones describen los efectos de la retroalimentación dentro del sistema. Cada uno de los elementos en ambas ecuaciones muestra una relación de retroalimentación, es decir, el flujo de cada stock depende, entre otros factores, también del tamaño del propio stock. Por ejemplo, el crecimiento de la población de conejos depende de la retroalimentación positiva (de refuerzo) asociada con el elemento k_2R : la tasa de crecimiento es proporcional al número de conejos, más conejos significa más crecimiento. Si los conejos no sufrieran el ataque de los zorros, su población aumentaría exponencialmente para siempre (por lo menos en este modelo). Se debe tener en cuenta también la retroalimentación negativa (estabilizadora) que vincula el número de conejos y el de zorros. El elemento $-k_1CR$ indica que cuantos más zorros (C) haya, más rápida será la disminución de conejos.

Todas estas consideraciones ofrecen datos acerca de las relaciones entre los dos elementos del sistema. Pero, con solo mirar las ecuaciones, no se puede comprender fácilmente cómo se comportará el sistema cuando todos sus elementos interactúen entre sí. Para ello habrá que resolver las ecuaciones, que se ejecuta como una simulación en la que los distintos stocks y flujos del sistema se determinan por etapas

en función del tiempo.

El sistema de ecuaciones vinculadas del sistema LV no tiene una solución analítica, pero puede resolverse iterativamente. El resultado es un patrón de oscilaciones en el número de presas y depredadores (conejos y zorros) tal y como muestra la figura 1.

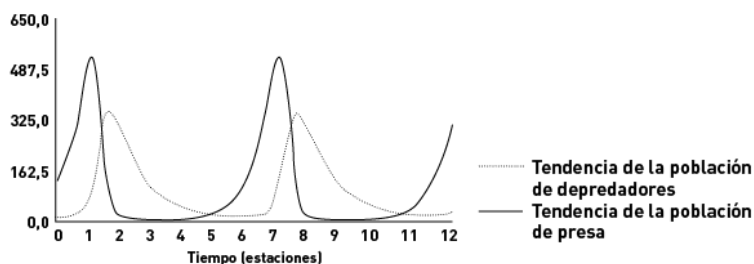
En la simulación, el juego de las retroalimentaciones hace que los depredadores y sus presas oscilen de fase entre sí. Ni el número de zorros ni el de los conejos tienden a ir a cero o a infinito. Cuando hay demasiados conejos, los zorros aumentan para disminuir la población. Cuando hay muchos zorros, estos mueren de inanición.

Obsérvese cómo en la figura 1B el número de conejos varía en función del número de zorros: el diagrama es una trayectoria cerrada que se repite siempre. Se puede decir que los zorros y los conejos “orbitan” sobre un punto que puede denominarse atractor del sistema. Este atractor consiste en un par de valores de ambas poblaciones que, si se alcanzan, estabiliza el sistema. Esto sucederá en el modelo LV si las ecuaciones se modifican añadiendo un término de “fricción” que, finalmente, provocará que el número de individuos de cada especie se estabilice en el valor del atractor. Pero en el sencillo caso aquí expuesto, tanto la órbita como la oscilación continuarán para siempre.

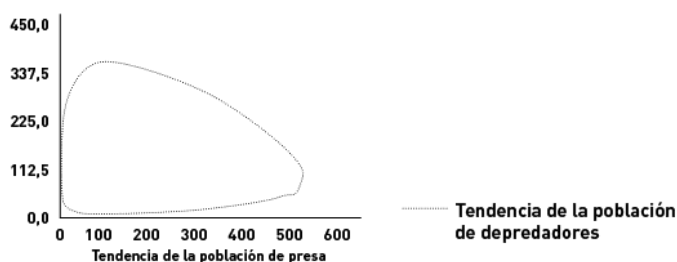
Figura 1

Resultados de la simulación de un modelo simple: el modelo ‘Lotka-Volterra’ (LV). Este modelo describe un sistema biológico simplificado donde dos especies (depredador y presa) interactúan. El resultado es la oscilación alrededor de un valor constante, debido a la relación de la retroalimentación con el sistema

A) Población



B) Fases



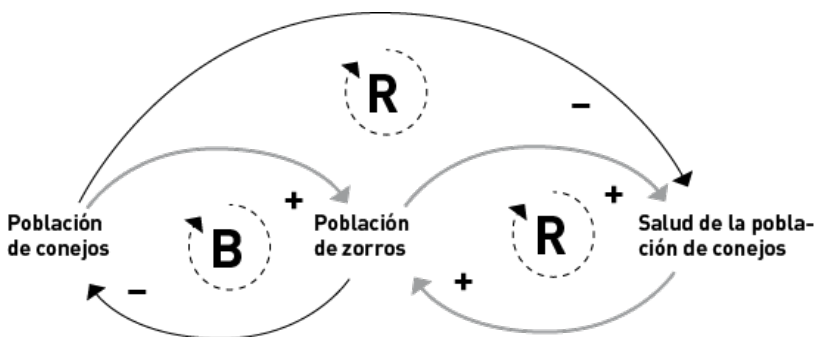
Nota: los cálculos se han realizado usando el paquete de software Vensim (TM).

El modelo LV es, por supuesto, una manera muy simplificada de describir cómo funciona un ecosistema, pero capta parte de la interrelación de diferentes especies biológicas en el mundo real. Nótese, entre otras cuestiones, que muestra homeostasis, es decir, tiende a mantener sus parámetros oscilando sobre valores fijos. Esta propiedad deriva de principios termodinámicos básicos que operan en sistemas sujetos a flujos externos de energía (Karnani et al., 2009).

Figura 2

Diagrama de bucle causal del sistema LV. En el gráfico, 'R' representa una retroalimentación positiva (de refuerzo) y 'b'

una negativa (estabilizadora)



Fuente de la imagen: Systems Wiki: www.systemswiki.org/

El modelo LV puede verse como un punto de partida para comprender los modelos de los sistemas socioeconómicos o biológicos. Normalmente, estos sistemas requieren un gran número de ecuaciones diferenciales y más parámetros. Al incorporar los ordenadores, es fácil usar métodos iterativos para resolver incluso un gran número de ecuaciones diferenciales vinculadas. El problema es que para la mente humana enseguida resulta difícil el manejo de un modelo con múltiples elementos, simplemente mirando las ecuaciones relativas. Por esta razón, normalmente se utilizan representaciones gráficas de los modelos de dinámica de sistemas.

La representación gráfica moderna de los sistemas dinámicos ha sido algo simplificada en comparación con las primeras versiones, aunque algunos elementos siguen siendo los mismos. Los stocks se representan como cuadrados y los flujos como flechas. Las retroalimentaciones positivas y negativas se muestran con los signos + o -, en ocasiones colocados entre paréntesis como “(+)” y “(-)”. A veces, la letra R se utiliza para indicar una retroalimentación de refuerzo (positiva) y la letra B para una negativa o estabilizadora. El ecologista americano Howard Thomas Odum (1994) diseñó en la década de los sesenta otro lenguaje más complejo de símbolos denominado

Energy System Language o Energese (Brown, 2004). En este lenguaje hay símbolos específicos para conceptos tales como “producción”, “conmutador”, “pérdida de energía” y otros. Sin embargo, en este documento se utilizará solo los comúnmente utilizados en la dinámica de sistemas.

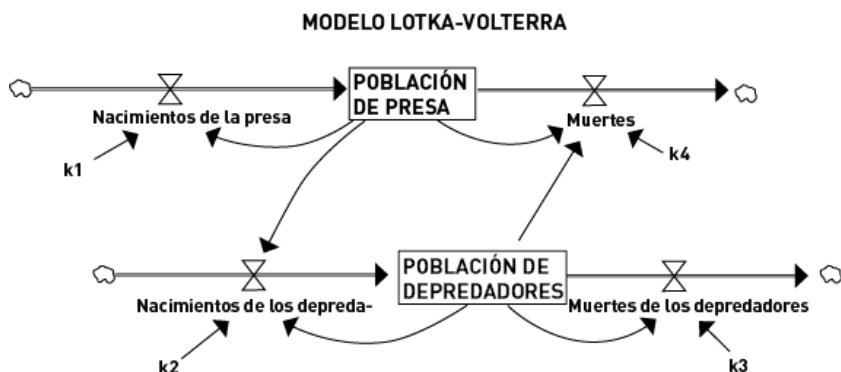
El modelo LV puede describirse usando los símbolos de la dinámica de sistemas, con lo conocido como “diagrama de bucle causal”, consistente en un diagrama que ilustra las relaciones interactivas básicas de los distintos elementos del modelo (figura 2). Muestra una versión simplificada del modelo LV, que hace hincapié en las relaciones de retroalimentación.

Los diagramas de bucle causal pueden ser utilizados para una primera y rápida comprensión de la estructura de un modelo. Estos diagramas son esquemas cualitativos que no se pueden utilizar para resolver las ecuaciones del modelo. Sin embargo, es posible utilizar interfaces gráficas informáticas que no solo describen visualmente el modelo, sino que están vinculadas a las ecuaciones relativas y permiten resolverlas de una manera interactiva (por ejemplo, Wilensky, 1999). Una interfaz de este tipo para el modelo LV se muestra en la figura 3.

En este tipo de interfaces gráficas los stocks se representan mediante cuadrados, como en los diagramas de bucle causal. En cambio, los flujos se representan por flechas de doble línea con un elemento denominado “válvula” que regula el flujo. Al igual que en los diagramas de bucle causal, las flechas de línea simple indican las relaciones de retroalimentación.

En el modelo LV el stock de presas (el cuadrado) está conectado al flujo (la válvula) por medio de una flecha de doble línea. La flecha de línea simple va desde el stock hasta el flujo indicando la retroalimentación. Una relación similar se da para el stock de depredadores, representado también en un cuadrado.

Representación del modelo LV que muestra una interfaz gráfica, de acuerdo con los gráficos utilizados en la dinámica de sistemas, basado en la interpretación del paquete de 'software' Vensim

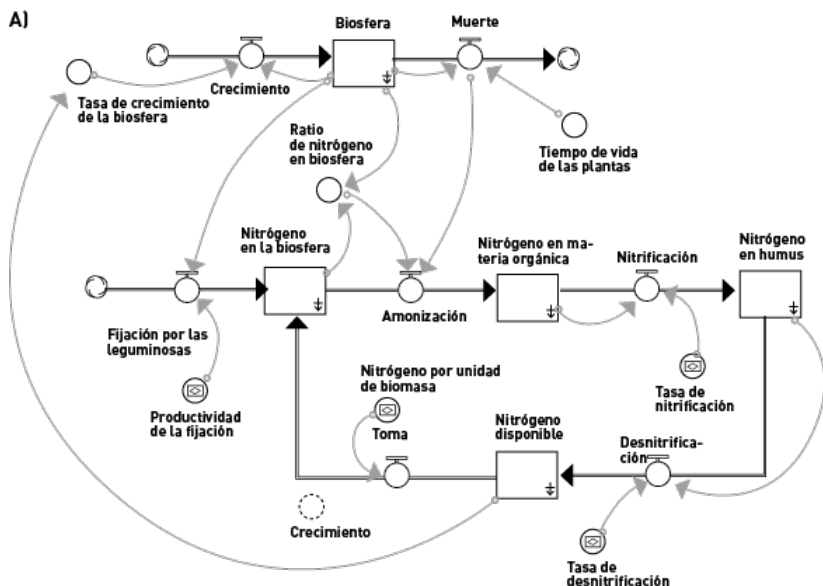


Los paquetes de software que ofrecen esta interfaz permiten a los usuarios resolver el modelo sin la necesidad de ver las ecuaciones. En cualquier caso, también es posible ir cambiando alternativamente de la imagen de los gráficos a las ecuaciones. Las opciones en el mercado son múltiples. En muchos casos, el software ofrece métodos interactivos muy sofisticados que permiten variar los parámetros del sistema mientras se observa el comportamiento de ese sistema frente a esas variaciones.

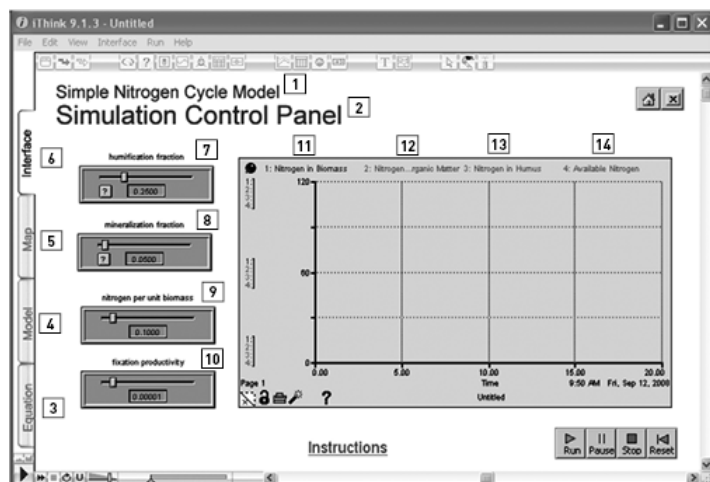
El uso de paquetes de software permite hacer frente a modelos dinámicos complejos que pueden servir para describir sistemas de negocios, sociales, económicos y otro tipo de sistemas (y cometer errores si no se es muy cuidadoso). La figura 4 muestra un ejemplo de sistema con múltiples elementos, el ciclo de nitrógeno del ecosistema terrestre.

Figura 4

Ejemplo de un modelo de dinámica de sistemas con múltiples elementos: el ciclo de nitrógeno del ecosistema terrestre mostrado utilizando el programa 'Stella'. a) muestra el modelo y b) el panel de simulación



B)



1. Modelo del ciclo del nitrógeno simple; 2. Panel de control de la simulación; 3. Ecuación; 4. Modelo; 5. Mapa; 6. Interfaz; 7. Tasa de humidificación; 8. Tasa de la mineralización; 9. Nitrógeno por unidad de biomasa; 10. Productividad de la fijación; 11. Nitrógeno en la biomasa; 12. Nitrógeno en materia orgánica; 13. Nitrógeno en humus; 14. Nitrógeno disponible

Fuente: www.systemswiki.org

Los resultados de las simulaciones se expresan normalmente

mediante gráficos o tablas, pero también puede hacerse con mapas dinámicos y animaciones. Un ejemplo especial de interfaz de usuario puede ser el “simulador de vuelo”, que permite observar cómo las propias decisiones afectan al comportamiento a corto y largo plazo del sistema, al variar los parámetros de entrada que afectan a los resultados de la simulación. Una interfaz así se muestra en la figura 4B. Un método similar ha sido desarrollado para el estudio de los efectos de la emisión de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre y las consecuencias de las políticas disponibles posibles para la reducción de las emisiones (Sterman y Sweenwey, 2007).

Hoy en día, el método más común para el estudio de los sistemas complejos no lineales sigue siendo la dinámica de sistemas en su forma de ecuaciones diferenciales vinculadas, gestionadas mediante interfaces gráficas. No es, sin embargo, el único método posible. Otra opción es el modelo basado en agente (AB), también llamado ABS, simulación basada en agente o MAS (simulación de agente múltiple) (véase Shoham y Leyton Brown, 2008).

Las simulaciones AB son una forma de modelización mediante el estudio en el nivel de agentes simples, como por ejemplo el ser humano como individuo en un sistema socioeconómico. Los modelos AB pueden tener un mayor grado de detalle que los modelos de dinámica de sistemas y normalmente incluyen características tales como ruido aleatorio. Por lo tanto, los modelos AB pueden ofrecer más posibilidades que las dinámicas del sistema, pero también necesitan más parámetros que no pueden ser conocidos con exactitud. En varios casos, los mismos sistemas pueden ser descritos por ambos modelos con resultados equivalentes. Por ejemplo, el modelo Hubbert de agotamiento del petróleo ha sido descrito con modelos AB (Bardi, 2005) y mediante dinámica de sistemas (Bardi y Lavacchi, 2009). Recientemente, hay un intento por utilizar el método AB para la modelización del mundo (Fiddaman, 2010 b).

Hay otros métodos de modelización de sistemas complejos, al

igual que existe una gran variedad de sistemas que podemos definir como “complejo”, “no lineal” o “dominados por la retroalimentación”. En general, este campo de estudio está todavía en desarrollo y constantemente surgen nuevos métodos y programas de software para su gestión. Sin embargo, cuanto más sofisticados se vuelven los modelos, más necesario es determinar su aplicabilidad al mundo real. El siguiente capítulo abordará esta cuestión fundamental y mostrará un ejemplo histórico.

CAPÍTULO 5

modelizando EL MUNDO REAL: LA CAZA DE BALLENAS EN EL SIGLO XIX

La caza de ballenas en el siglo XIX atravesó un ciclo espectacular de crecimiento y declive. Comenzó como una forma humilde de obtener sustento para los pueblos aborígenes, pero en unas pocas décadas pasó a ser una importante industria mundial. Posteriormente, en la segunda mitad del siglo XIX perdió importancia y al final del siglo había prácticamente desaparecido. En este capítulo se verá cómo este sistema del mundo real puede ser cuantitativamente descrito utilizando el enfoque de la dinámica de sistemas.

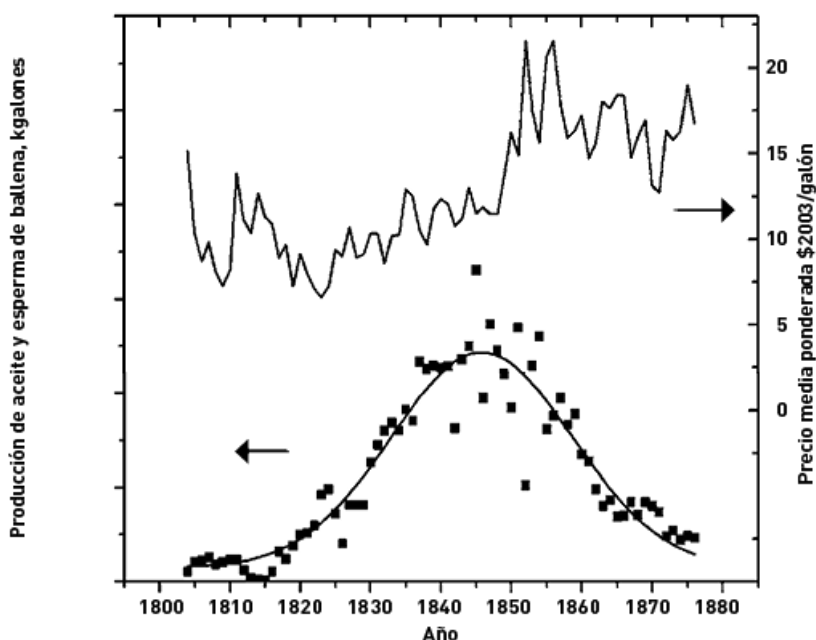
Antes de entrar en los modelos actuales, es necesario comprender cómo funcionaba la industria ballenera en el siglo XIX. Todo el mundo tiene un modelo mental de los tiempos de la novela de Herman Melville, *Moby Dick*. Queda claro, a partir de la novela, que se capturaban y mataban ballenas por el “aceite de ballena”, pero quizá cueste entender que este se utilizaba como combustible para lámparas¹. Para Herman Melville era obvio, pero no para nosotros.

A comienzos del siglo XIX la iluminación de interiores se basaba, en la práctica totalidad del mundo, en las lámparas de aceite. Se trataba de una antigua tecnología que se remontaba a las sociedades cazadoras y recolectoras que usaban la grasa animal como combustible (Kimpe et al., 2001). Gracias a la expansión económica que supuso el carbón, la población aumentó en todo el mundo, lo que generó una gran demanda de combustible para lámparas. Este tenía que ser líquido, el carbón solo no era práctico como fuente de iluminación. Las lámparas de gas (que se obtenía del carbón) podían ser una opción, pero el gas ciudad solo estaba disponible en las grandes ciudades y su uso comenzó a mediados de siglo. La bombilla, inventada por Thomas Alva Edison en 1879, no dominó el mercado hasta bien entradas las primeras décadas del siglo XX. Por consiguiente, las lámparas de aceite

mantuvieron un uso generalizado durante la mayor parte del siglo XIX.

Gráfico 1

Precios y producción de aceite de ballena en el siglo XIX, de Bardi (2007b)



Fuente: reproducido con el permiso de Taylor y Francis (eds.).

Las ballenas no habían evolucionado para producir el combustible para lámparas que utilizaban los humanos, pero algunas especies almacenaban grasa en forma de líquido transparente que tenía la ventaja de arder limpiamente, sin

producir olores. El aceite de ballena resultó ser menos caro que los aceites vegetales. Como consecuencia de ello, a principios del siglo XIX, el rápido incremento de la demanda de aceite de ballena generó toda una industria. Alrededor de 1850, la industria ballenera americana se encontraba en su pico más alto, produciendo un total de cerca de 15 millones de galones de aceite al año (Starbuck, 1878). Pero el declive estaba a la vuelta de la esquina.

El gráfico 1 muestra la producción de aceite de ballena en América (Bardi, 2007b). Los datos de producción suman las contribuciones de las dos principales especies capturadas en aquellos tiempos: ballena “franca” y cachalote. Se capturaron también otras especies, pero su contribución fue menor (gráfico 1).

Como se ve, la curva de producción tiene “forma de campana” y es casi simétrica. Se puede ajustar razonablemente bien utilizando la función gaussiana o la derivada de una curva logística (Bardi, 2007b). Esta forma de la curva de producción se observa a menudo para la explotación de los recursos minerales, como señaló Marion King Hubbert (1956) para el caso del crudo en la zona continental de EE UU. Se observaron muchos otros ejemplos de este comportamiento en otros recursos minerales (Bardi y Pagani, 2007) y no sorprende que la lenta reproducción de las ballenas se comporte de la misma forma que los recursos no renovables cuando se explotan mediante una industria de rápido crecimiento. Pero ¿por qué exactamente la curva tiene forma de campana?

De acuerdo con las visiones establecidas en economía, el aumento de los precios debería conducir a un incremento de la producción. Sin embargo, los datos históricos en el caso del aceite de ballena no muestran esta correlación. En la primera fase del ciclo, la producción subió mientras que los precios permanecieron prácticamente constantes. Justo antes y después del pico productivo, los precios subieron pero la producción mermó. El problema aquí es que la creencia tradicional en la economía ve a los mercados como entidades básicamente estáticas, cambiando solamente en respuesta a

pequeñas perturbaciones. Pero el mercado del aceite de ballena cambió muy rápidamente, yendo desde cero a 15 millones de galones por año en unas pocas décadas y después volviendo casi a cero. Todo esto en menos de un siglo. En efecto, lo que se necesita aquí es un tipo diferente de enfoque: la dinámica de sistemas que fue especialmente diseñada para este tipo de sistemas de rápida evolución.

Una de las posibles interpretaciones de los datos históricos es que la producción de aceite de ballena alcanzó su pico y luego disminuyó sobre todo porque los balleneros se iban quedando gradualmente sin ballenas, al menos del tipo que podía capturarse y dar muerte mediante la tecnología del momento, mayormente la ballena “franca”². Esta interpretación es confirmada por las estimaciones de los biólogos marinos que habían calculado que, al final del siglo XIX, solo quedarían en los océanos del mundo unas 50 hembras de la ballena “franca” (Baker y Clapham, 2004).

Por tanto, la caza de ballenas en el siglo XIX puede considerarse como un sistema económico caracterizado por la disponibilidad del recurso utilizado: las ballenas. Esta es, por supuesto, una aproximación, pero todos los modelos son aproximados. La cuestión es ver si una aproximación específica es lo suficientemente buena para describir el sistema. Siguiendo esta línea de pensamiento, se puede ver el sistema como una ecología pequeña y autónoma, lo suficientemente simple que podemos pensar que puede describirse como una dinámica de depredador (ballenero) y presa (ballena), esto es, mediante la ecuación Lotka-Volterra. De acuerdo con esta línea de pensamiento, se puede reducir el sistema a solo dos stocks: el de las ballenas y el de los barcos balleneros. Las ballenas tenían pocos depredadores, si es que tenían alguno, aparte de los humanos, y los balleneros estaban especializados en la captura de ballenas y no en la de otras especies.

Ahora, se necesita considerar cómo estos stocks varían dependiendo de su interacción recíproca. El sistema Lotka-Volterra descrito ya en el capítulo anterior se puede escribir como dos ecuaciones diferenciales que vinculan la relación

existente entre presas y depredadores. Para el caso específico de la caza de ballenas se puede utilizar incluso una versión más simple. Las ballenas, se reproducen muy lentamente y por ello se puede descartar el término “reproducción”, el último de la primera ecuación. Esta es una presunción que puede confirmarse utilizando el modelo completo y comparando los resultados (Bardi y Lavacchi, 2009).

Así, se puede escribir esta versión simplificada del modelo como:

$$R' = -k_1CR$$

$$C' = k_2CR - k_3C$$

En esta versión hay dos stocks principales: capital (C) y recursos (R). R es (o es proporcional a) el número de ballenas vivas en el océano, mientras que C es un parámetro agregado proporcional al capital acumulado por la industria ballenera: barcos, equipos, instalaciones, etc.

Las ecuaciones describen una situación en la cual el stock de ballenas (R) se reduce proporcionalmente al número de naves balleneras y al número de ballenas (k_1CR). Esta presunción es razonable: cuantos más balleneros haya, más ballenas capturarán, pero para que esto ocurra debe haber ballenas; y cuantas más ballenas haya, más capturas habrá. Así pues, el modelo asume que el stock capital aumentará en proporción al número de capturas (CR). Esta es una suposición lógica que implica que la industria crecerá en proporción a su beneficio, pero la dimensión de la industria también disminuirá en proporción a su propia dimensión. Este efecto a menudo es referido como “depreciación” del capital. Este modelo es parecido al conocido en la teoría económica como el modelo de “libre acceso” (Smith, 1968).

El modelo se puede resolver de forma cualitativa y los

resultados se muestran en el gráfico 2 (obtenido mediante la utilización del software Vensim).

Como se muestra en el gráfico, el modelo genera un único ciclo de crecimiento que parece similar a uno de los ciclos del modelo estándar de Lotka-Volterra presentado en el capítulo anterior. Sin embargo, teniendo en cuenta que el recurso no es renovable, el sistema nunca alcanzará un estado “homeostático” constante u oscilante; más bien crece y disminuye hasta que “muere” en el momento en que ya no queden más recursos disponibles.

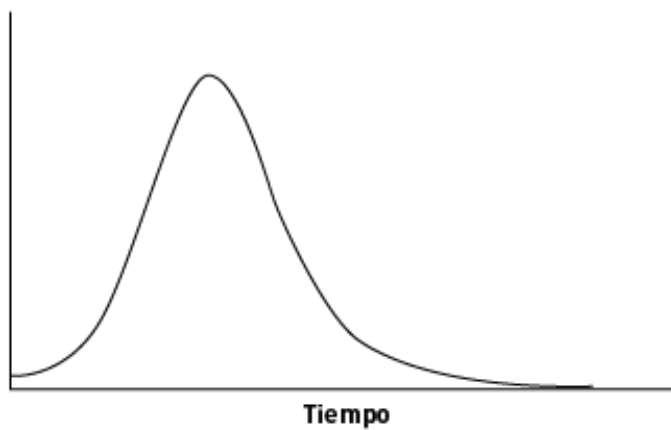
Si los resultados cualitativos del modelo tienen sentido, entonces la cuestión es si describen los datos históricos del mundo real. Para verificar este punto se necesitan datos sobre, al menos, algunos de los parámetros del sistema histórico. No se dispone de datos fiables sobre la cantidad de ballenas existente en el siglo XIX, pero hay datos sobre la producción de aceite de ballena en EE UU (Starbuck, 1878) y esto es algo que podemos usar como proporcional al parámetro “producción” (R'). En relación con el stock “capital”, podemos utilizar un conjunto de datos “indirectos”, asumiendo que es proporcional al número (o tonelaje total) de los barcos balleneros disponibles en América, otro conjunto de datos conocido (Starbuck, 1878).

En este punto, las constantes en el modelo pueden variar para encajar los datos experimentales y resulta que el modelo puede describir la evolución histórica del sistema; como se puede comprobar en el gráfico 3 (Bardi y Lavacchi, 2009).

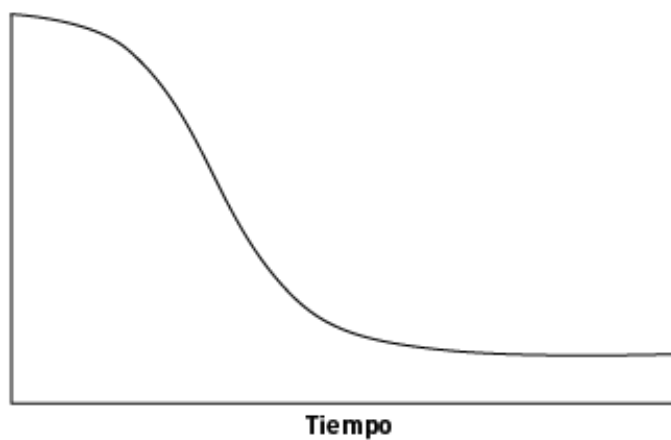
Gráfico 2

Soluciones cualitativas del modelo simplificado Lotka-Volterra descrito en el texto. Resultados obtenidos utilizando el ‘software’ Vensim

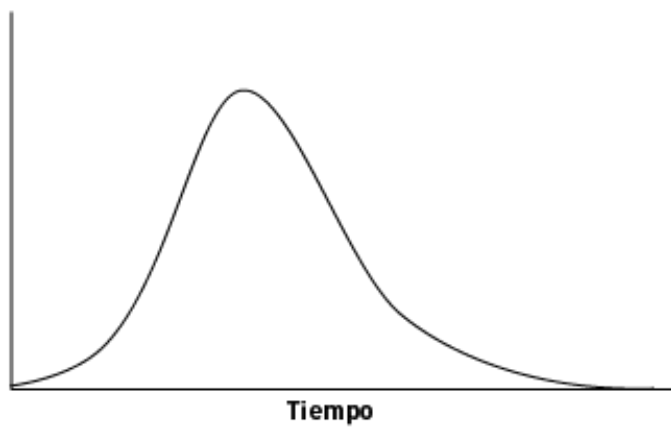
Producción



Stock de recursos



Stock de capital



El hecho de que el modelo pueda encajar los datos no significa que sea el único que lo puede hacer o que pueda ser considerado automáticamente válido. No obstante, ajustar este tipo de curvas constituye una prueba difícil: es razonablemente fácil ajustar un único parámetro (producción o capital acumulado), pero no resulta nada fácil hallar un conjunto de constantes que puedan ajustarse a ambos. En este sentido, la capacidad del modelo para describir los datos es un fuerte indicador de que los dos stocks del modelo, recursos y capital, están de hecho relacionados el uno con el otro a través de una relación de retroalimentación.

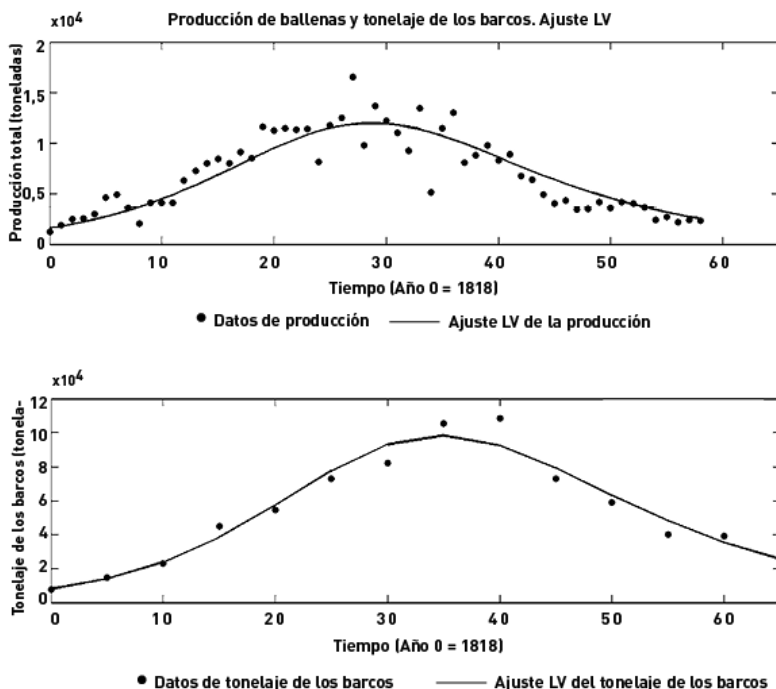
Un elemento a ser discutido acerca de la captura de ballenas es la posibilidad de que el descenso en la producción pueda haber sido causado por factores tecnológicos más que económicos. ¿Podría ser que el aceite de ballena estuviera siendo sustituido por un combustible más barato como el queroseno derivado del petróleo? Este fue seguramente un factor a considerar en la última etapa del ciclo de la captura de ballenas, pero en el momento en que el primer pozo petrolífero fue excavado en Pensilvania, en 1859, la producción de aceite de ballena ya era la mitad de lo que había sido en su pico. Llevó varios años que el queroseno adelantase al aceite de ballena (Laherrere, 2004). Aparte de esto, el queroseno era ampliamente considerado un combustible inferior al aceite de ballena y es probable que solo la continua disminución de la producción de aceite de ballena —y asociado a ello, los altos precios— estimulara el crecimiento de la producción del queroseno. De esta forma, el modelo basado en la merma de los recursos sigue siendo válido para la mayor parte del ciclo productivo.

Desde luego, el modelo descarta varios factores importantes como los precios y el progreso tecnológico. Aun así, puede verse como un modelo “de orden cero”, que logra encajar los principales elementos de la historia de la industria ballenera estadounidense. De acuerdo al modelo, se cuenta con un ejemplo del ciclo económico generado por la progresiva sobreexplotación de un recurso de renovación lenta. La industria creció sobre los beneficios de su inicialmente abundante recurso. Con el tiempo, sin embargo, la disminución

del número de ballenas redujo las ganancias de la industria. En un momento dado, estos beneficios llegaron a ser demasiado bajos para mantener el crecimiento de la industria y, eventualmente, causó el inicio de su declive. Este declive se aceleró, probablemente, en momentos posteriores, debido al desarrollo de combustibles alternativos como el queroseno.

Gráfico 3

Ajuste cuantitativo de los datos históricos para el aceite de ballena. Curva superior: producción de aceite; curva inferior: tonelaje de los barcos. De Bardi y Lavacchi (2009)



fuelle: MDPI.

Otros casos históricos en los que el modelo resultó ser capaz de describir los sistemas económicos reales son la extracción de oro en California y Sudáfrica y la producción de petróleo en la zona continental de EE UU y Noruega (Bardi y Lavacchi, 2009). Es probable que haya muchos más sistemas que se puedan modelizar de esta manera.

Este enfoque demuestra que incluso los modelos muy simples basados en conceptos dinámicos pueden proporcionar un buen ajuste a los datos históricos e ilustra cómo las retroalimentaciones negativas y positivas se combinan en el proceso de explotación de los recursos. Obviamente, la dinámica de sistemas constituye un vasto campo y el modelo aquí descrito es solo un punto de partida, tan simple, que algunos científicos de sistemas no lo reconocerían como parte de la familia de la dinámica de sistemas. No obstante, los modelos simples como este tienen la ventaja de que sea posible un ajuste cuantitativo de los datos experimentales, un enfoque que habitualmente no es posible y que a menudo ni si quiera se pretende en modelos más complejos de la dinámica de sistemas. El modelo Lotka-Volterra se ha mostrado aquí solo como un punto de partida para entender los principales elementos de la dinámica de sistemas. En los próximos capítulos se examinarán en detalle modelos más complejos.

Notas

1. Melville da pistas de que el aceite de ballena se utilizaba para encender lámparas cuando describe a Stubb comiendo carne de ballena, diciendo: “Que un mortal se alimente de la criatura que alimenta su lámpara y, como Stubb, la coma a la luz de su propia luz, por así decirlo, es cosa tan extraña”, capítulo LXV, Moby Dick.
2. Señalar que en la elección del nombre ballena “franca” (en inglés “right” whale) con la intención de indicar “fácil de matar”, las

ballenas no fueron consultadas.

CAPÍTULO 6

la modelización DEL MUNDO MEDIANTE LA DINÁMICA DE SISTEMAS

En la historia de la ciencia, salvar la distancia entre distintos campos científicos normalmente conduce a nuevas ideas y descubrimientos, tal y como ha ocurrido muchas veces desde la época de Galileo. En los años cincuenta, una de estas distancias se salvó cuando comenzó a surgir el concepto de que algunos modelos matemáticos utilizados en ingeniería podían utilizarse para otro tipo de sistemas, tales como el social y el económico.

Ya se sabía que algunos sistemas mecánicos eran altamente no lineales, como la válvula reguladora de una máquina de vapor. Estos sistemas mostraron características de las retroalimentaciones positivas y negativas que eran típicas de los sistemas económicos, así como de algunos sistemas sociales y biológicos. Al desarrollarse las computadoras digitales, la ambiciosa idea de utilizar métodos desarrollados por la ingeniería para describir sistemas económicos y sociales parecía muy prometedora. Esto, finalmente, despejó el camino para el estudio de LDC, que intentó modelar el mundo entero en sus aspectos económicos, ecológicos y sociales.

Arnold Tustin, de la escuela de economía de Londres, fue uno de los primeros en trabajar con modelos no lineales en economía en su libro titulado *The Mechanism of Economic Systems: An approach to the problem of economic stabilization from the point of view of control system engineering* (Tustin, 1954). Otro ingeniero, R. G. D. Allen, publicó *The Engineer's Approach to Economic Models* (Allen, 1955). El economista Alban Philips publicó algunos artículos sobre el tema de utilizar métodos de ingeniería para modelizar la economía (Phillips, 1950, 1954).

Todos estos estudios reconocían la importancia de los mismos elementos: retrasos, bucles de retroalimentación, stocks, flujos,

y el hecho de que la dinámica de sistemas no es explicable mediante una simple relación de causa y efecto. Fue un conjunto de ideas muy innovador que solamente podía ser puesto en práctica por medio de las computadoras digitales recientemente desarrolladas. Con las computadoras, por primera vez en la historia, era posible examinar, de forma rápida y sencilla, el comportamiento de los sistemas de muchas ecuaciones diferenciales vinculadas.

Una contribución fundamental en este campo vino de la mano de Jay Forrester, quien, en los años sesenta en la Escuela de Administración Sloan del MIT, había empezado a desarrollar sus modelos dinámicos de socioeconomía a nivel de ciudades y vecindarios. Denominó a estos estudios “dinámicas urbanas” en un libro del mismo título (Forrester, 1969). Más tarde, los conceptos de “dinámicas industriales” y de “dinámicas urbanas” se fundieron en el término más general de “dinámica de sistemas”, el cual, desde el punto de vista de Forrester, describía la aplicación del método a todo tipo de sistemas económicos y sociales. Así es como Forrester explicó la forma en que veía este campo (Forrester, 1998):

La gente es reacia a creer que los sistemas físicos y los sistemas humanos tienen la misma naturaleza. Aunque los sistemas sociales son más complejos que los físicos, pertenecen a la misma clase de sistemas altamente organizados, retroalimentados y no lineales, a la que pertenecen los sistemas físicos. La idea de un sistema social implica que las relaciones entre sus partes influyen fuertemente el comportamiento humano. Un sistema social limita fuertemente el comportamiento de los individuos. En otras palabras, el concepto de sistema contradice la creencia de que las personas son agentes totalmente libres. En su lugar, las personas son considerablemente sensibles a los cambios de su entorno. Para tratar el asunto sin rodeos, un sistema social implica que las personas actúan en parte como engranajes de una máquina social y económica. La gente representa su papel siendo determinada por las presiones de todo el sistema. Aceptar la preponderancia de los sistemas sociales sobre los individuos es contrario a nuestra preciada ilusión de que la gente toma sus

propias decisiones libremente.

A la larga, Forrester usó los conceptos de este nuevo campo para estudiar el sistema económico del mundo entero. En 1971 publicó su trabajo sobre la modelización del mundo bajo el título *World Dynamics* (Forrester, 1971).

El libro de Forrester no se concibió como un estudio exhaustivo. La tarea de modelizar el mundo de una manera más detallada recayó sobre otro estudio, *Los límites del crecimiento*, un trabajo promovido por el Club de Roma y llevado a cabo por un grupo de jóvenes científicos (Meadows et al., 1972). Los detalles técnicos sobre este estudio se publicaron en un trabajo posterior (Meadows et al., 1974). Más tarde, en 1992 y en 2004, algunos de los autores del primer estudio de LDC publicaron las actualizaciones de sus cálculos bajo los títulos de *Beyond the Limits* (Meadows et al., 1992) y *Limits to growth, the 30 years update* (Meadows et al., 2004). Los modelos y la base de datos se perfeccionaron y ampliaron en estos estudios posteriores, pero los resultados fueron básicamente los mismos.

Los modelos subyacentes en *World Dynamics* (Forrester, 1971) y en *Los límites del crecimiento* están basados en principios similares. El mundo está dividido en una serie de subsistemas; agricultura, industria, población, etc., y las relaciones entre los elementos de los subsistemas se describen a través de un conjunto de ecuaciones que se resuelven repetidamente con el fin de determinar la evolución en el tiempo del sistema.

El arte de modelizar se basa en seleccionar los elementos del sistema. Un modelo que integra la mayor parte de los subsistemas en un pequeño número de parámetros se dice que está “agregado”. Cuantos más elementos se agreguen juntos, más aproximado será la modelización. Pero un modelo agregado requiere un número menor de hipótesis, y por eso es menos sensible a las incertidumbres inherentes que son inevitables cuando se estima un gran número de parámetros de entrada.

Tanto Forrester como el equipo de LDC eligieron los modelos muy agregados, algo por lo que fueron criticados posteriormente. Pero, para estos primeros modelos, eran la única opción posible, y era buena siempre que se comprendieran sus limitaciones y sus propósitos.

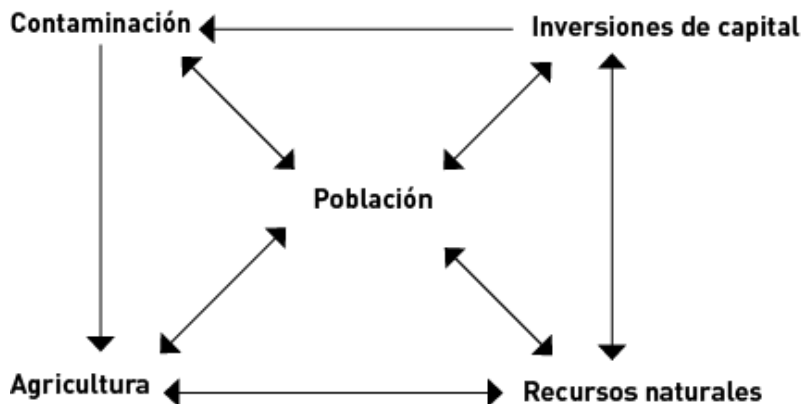
Aquí, consideraremos en detalle solamente el estudio de LDC. En el primer libro publicado (1972), el modelo ya era muy complicado, con cientos de parámetros y muchos niveles. Sin embargo, el modelo enfatizaba la interacción entre cinco sectores que se pueden resumir en:

- 1. Población humana.**
- 2. Recursos no renovables (minerales).**
- 3. Recursos renovables (agricultura).**
- 4. Recursos de capital.**
- 5. Contaminación.**

Los cinco elementos se muestran de forma gráfica esquemática (Myrtveit, 2005) en la figura 1:

Figura 1

Una representación simplificada de los cinco principales elementos del modelo World3: población, contaminación, capital, recursos agrícolas y recursos minerales



Fuente: Myrteveit (2005), imagen cortesía de Magne Myrteveit.

Este esquema tiene que considerarse con cautela, dada su simplificación del modelo actual. No obstante, se trata de una forma familiarizarse con las características del modelo. En la práctica, la versión gráfica del modelo completo del mundo, con todas las interacciones entre elementos, ocupa dos páginas completas del primer libro de LDC. El comportamiento de los subsistemas del modelo puede describirse de una forma relativamente simple. Por ejemplo, el diagrama de bucle causal que se recoge más adelante puede describir el subsistema de capital industrial (figura 2).

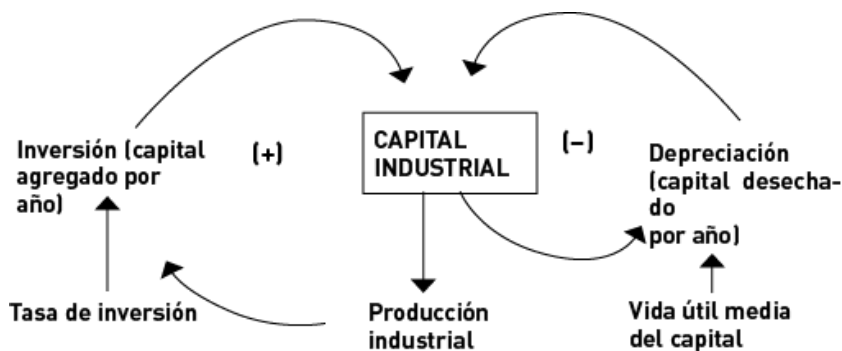
Estas interacciones también podrían describirse con palabras, en vez de mediante ecuaciones o diagramas. Como ejemplo, el párrafo siguiente describe el “núcleo” del modelo World3 desde el punto de vista de las interacciones del elemento de capital industrial con los otros elementos del modelo, de la edición de 2004 de LDC (Meadows et al., 2004):

El stock de capital industrial crece a un nivel que requiere una enorme inversión de recursos. En el propio proceso de crecimiento, se agotan una gran parte de los recursos disponibles. Como los precios de los recursos suben y las minas se agotan, se necesita cada vez más capital para la obtención

de recursos, quedando menos para invertir en el crecimiento futuro. Por último, la inversión no puede mantener el ritmo de depreciación, y el tejido industrial cae, llevándose consigo el sistema agrícola y el de servicios que se ha vuelto dependiente de los insumos industriales.

Figura 2

Diagrama de bucle causal del sector del capital del modelo World3 de Meadows ‘et al.’ (2004)



Fuente: cortesía de Dennis Meadows.

Como se puede apreciar, el capital y los recursos se comportan de una manera similar a como lo hacen los “depredadores” y la “presa” en el modelo Lotka-Volterra, descrito en el anterior capítulo. En otras palabras, el “capital” (un agregado de los recursos económicos) aumenta a costa de los recursos naturales como los depredadores aumentan a costa de su presa. Desde luego, la simple relación depredador-presa está integrada en un modelo mundial mucho más complejo, en el que un gran número de elementos interactúan entre sí. Así

pues, las relaciones entre los elementos no son siempre tan simples como en el modelo “depredador-presa”. Un ejemplo de ello es el bucle para el sector “población” (figura 3).

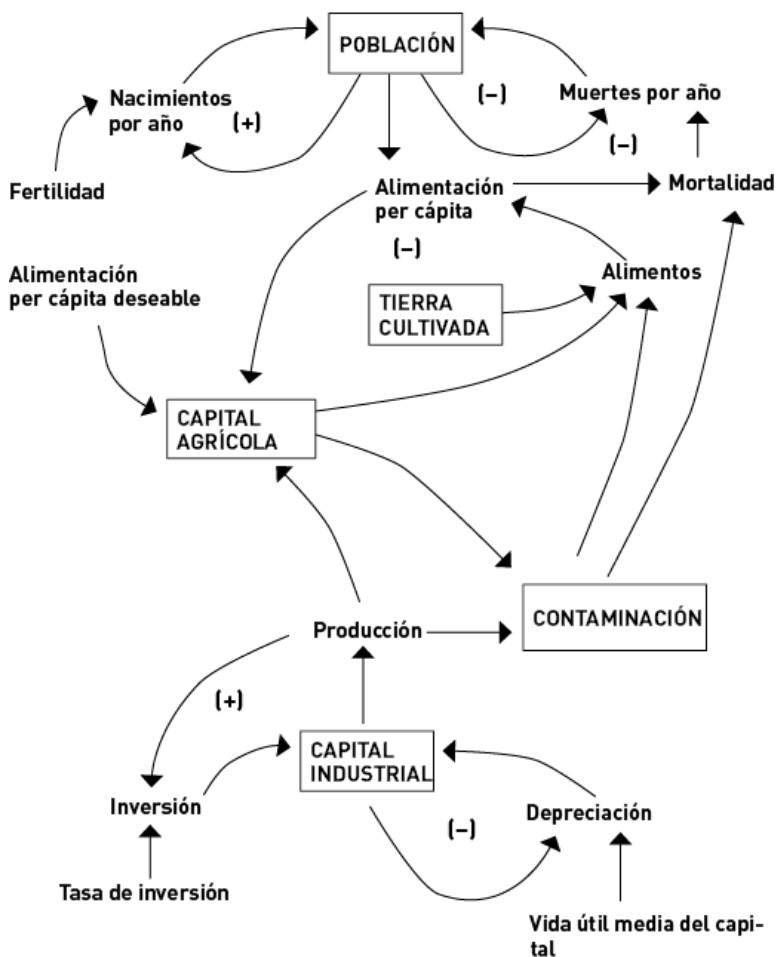
Tal y como se implementa en el modelo World3, este subsistema tiene en cuenta varios factores, incluyendo el hecho de que el crecimiento de la población no es simplemente proporcional a la disponibilidad de servicios y alimentos. Este es un fenómeno conocido: la disponibilidad de tales servicios como formación, la existencia de igualdad social y, en general, de riqueza, reduce la tasa de crecimiento de la población humana. Es un fenómeno conocido como “transición demográfica” que fue descubierto en 1929 por Warren Thompson (Encyclopedia of population, 2003).

El comportamiento general del sistema mundial descrito por el modelo World3 resulta estar caracterizado por fuertes rasgos. La mayoría de los escenarios muestran que, al principio de la simulación, las retroalimentaciones positivas asociadas a la explotación de recursos naturales abundantes conducen a que la producción agrícola e industrial crezca rápidamente, mientras que la contaminación no pone restricciones al crecimiento. En estas condiciones, la sociedad acumula capital industrial en forma de equipamiento, recursos y conocimiento. Con el tiempo, sin embargo, se van agotando los recursos naturales y se hace más cara su producción. Al mismo tiempo, la contaminación se convierte en un factor significativamente negativo que afecta al crecimiento. A medida que pasa el tiempo, se necesita cada vez más capital para mantener el crecimiento y, finalmente, resulta imposible mantener el crecimiento de la producción agrícola e industrial, ambas alcanzan un pico y empiezan a descender. Después, el capital acumulado también muestra un pico y empieza a descender. Unido a este fenómeno, la población también sigue un ciclo: crece con el aumento de la producción de alimentos y servicios. El crecimiento de la población afecta a la disponibilidad de capital, aumenta el agotamiento de los recursos naturales y genera contaminación. Deja de crecer algunos años después del pico de producción industrial y agrícola, como resultado de la reducción de alimentos y

servicios disponibles.

Figura 3

Diagrama de bucle causal del sector de la población del modelo de LDC de Meadows 'et al.' (2004)

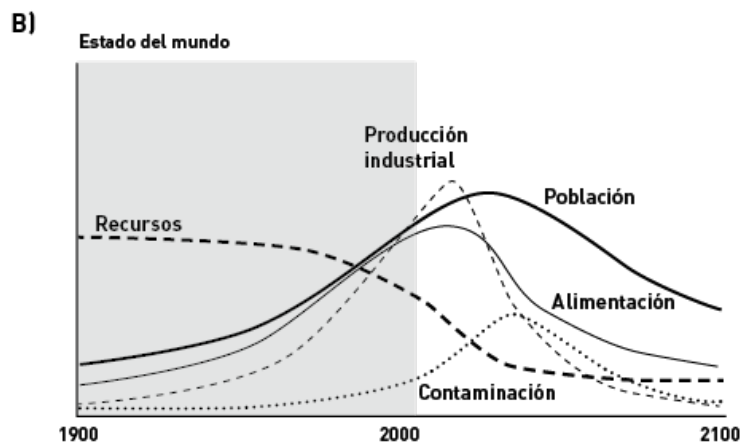
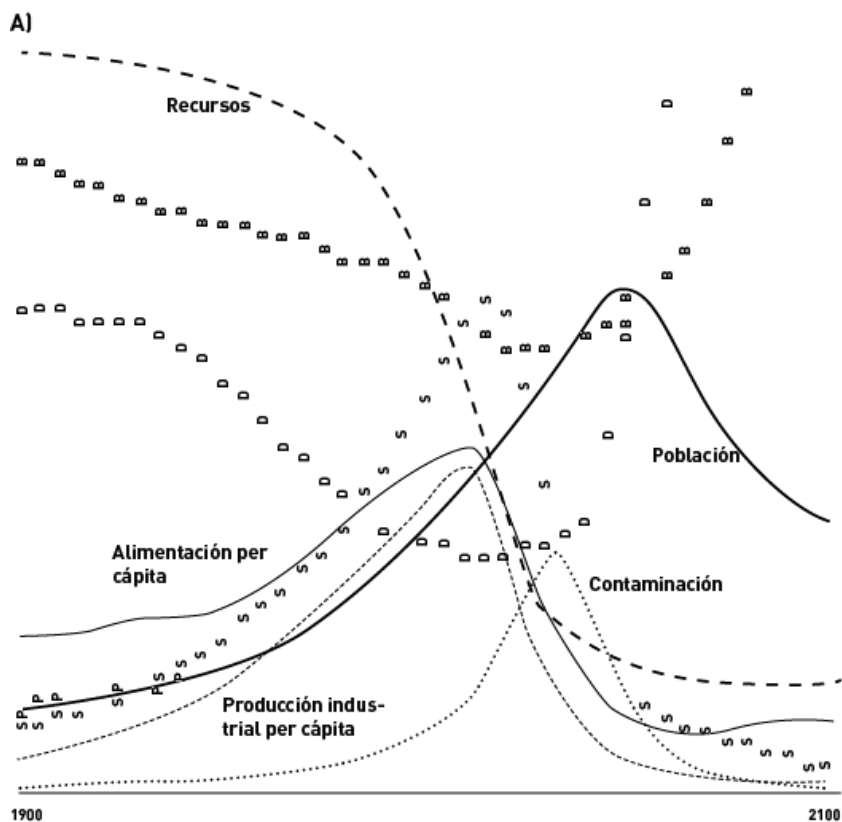


Fuente: cortesía de Dennis Meadows.

Este comportamiento es más evidente en la simulación que los autores llaman el “funcionamiento estándar” o el modelo del “caso base”. En las tres versiones de LDC, el funcionamiento del caso base es el que utilizaba como datos de entrada los que, según los autores, eran los más fiables disponibles. En el gráfico 1 se puede ver una comparación de los resultados obtenidos en 1972, en la primera versión de LDC y de aquellos que aparecen en la versión más reciente (Meadows et al., 2004).

Gráfico 1

Comparación del modelo de ‘caso base’. Cálculos de las ediciones de 1972 y 2004 de ‘Los límites del crecimiento’ (obsérvese la diferencia en escala: la escala vertical del recorrido de 2004 es el doble de larga que la de 1972). De Meadows ‘et al.’ (2004)



Fuente: cortesía de Dennis Meadows.

Debe tenerse en cuenta que la escala vertical no es la misma en los dos gráficos. Aparte de este aspecto, sin embargo, los resultados generales son muy similares. El pico de la producción industrial y agrícola mundial ocurre aproximadamente al mismo tiempo en ambos, mientras que la curva de población humana muestra un pico anterior en el tiempo en los cálculos más recientes. Esta diferencia es efecto de utilizar diferentes hipótesis sobre la forma en la que el stock de población se relaciona con los otros elementos del modelo.

En el escenario del caso base, la contaminación no es la restricción más importante del crecimiento. Más bien, el principal factor que frena el crecimiento es la necesidad de desviar cada vez más recursos de capital para mantener la producción de alimentos y servicios. Partiendo de que los recursos de capital son limitados, el resultado general es que el crecimiento se frena; la producción alcanza un pico y entonces descende. En cierto modo, este comportamiento es el resultado de fuerzas que actúan de una forma similar a las que hicieron caer la industria ballenera en el siglo XIX, como se describió en el capítulo anterior.

Los análisis aportados de forma independiente por Turner (2008) y por Hall y Day (2009) muestran una destacable buena correspondencia entre el comportamiento calculado en el escenario del caso base de LDC y los datos históricos hasta la actualidad. Hall y Day (2009) también argumentan que simplemente fue la forma rudimentaria de dibujar los ejes x con la tecnología informática de 1972 la que informó mal o permitió a los críticos concluir que el modelo era incorrecto.

No es posible aún afirmar si el colapso imaginado en el “funcionamiento estándar” de LDC está empezando a darse ahora, tal y como parecen indicar la recesión en curso, la aparente interrupción del rápido aumento de la producción de petróleo y las crecientes incertidumbres alimentarias en 2011. Si efectivamente vemos que el sistema económico continúa decayendo en un futuro próximo, el modelo del caso base de 1972 resultará tener un valor predictivo inesperadamente

bueno.

Pero la predicción no es, y nunca fue, el principal propósito de LDC. Más bien, se trataba de facilitar a los lectores un esquema mental de cómo, si se modifican los datos de entrada para varios elementos, varían los resultados del modelo. No se puede esperar que el modelo y sus resultados predigan el futuro, sino que nos ofrecen una manera de afrontarlo. De hecho, desde el primer momento se pretendió que LDC proporcionara un abanico de escenarios que examinarían y evaluarían varias hipótesis tipo “qué pasaría si”. ¿Qué pasaría si los recursos naturales fueran más abundantes de lo que se piensa? ¿Qué pasaría si hubiera una mejora en la producción energética? ¿Qué pasaría si los humanos acordaran frenar el crecimiento de la contaminación? Estos y muchos otros efectos pueden ser examinados utilizando el modelo World3 desarrollado para Los límites del crecimiento.

En tres libros diferentes (Meadows et al., 1972, 1992, 2004), los autores emprendieron un importante esfuerzo para explorar y describir una amplia gama de escenarios. Aquí sería imposible entrar en todos los detalles, por lo que se invita al lector a que examine la última versión del estudio de LDC (Meadows et al., 2004) para conocer el trabajo realizado. En cualquier caso, podemos resumir aquí algunos de los puntos importantes.

Básicamente, el estudio de LDC examina tres conjuntos distintos de posibilidades:

1. Diferentes parámetros de entrada: por ejemplo, mayores cantidades de recursos naturales.
2. Efectos tecnológicos: por ejemplo, mayor eficiencia en la explotación de los recursos, mayores rendimientos agrícolas y mayor capacidad para reducir la contaminación.
3. Cambios en las políticas: por ejemplo, limitación de la tasa de explotación de los recursos o el control de la población.

El primer conjunto de posibilidades, diferentes parámetros de entrada, tiene básicamente relación con la exploración de la hipótesis “¿Y si los recursos no renovables fueran más abundantes de lo que se supuso en el escenario del caso base?”. Ahora bien, una cantidad inicial de recursos mayor no cambia el comportamiento básico del modelo. Con más recursos naturales, la producción industrial y agrícola crecerían a niveles mayores de los del “funcionamiento estándar”, pero el colapso sucedería de todas formas, aunque más tarde, generándose por el agotamiento o por el efecto de la contaminación desenfrenada (o por ambos efectos al mismo tiempo).

El modelo también puede abordar la innovación tecnológica, aunque de forma indirecta. El modelo no cuenta con un parámetro explícito de “progreso”, pero es posible modelizar la innovación desde el punto de vista de sus efectos sobre otros parámetros. Por ejemplo, una mejora en la producción de energía se manifestaría en la disponibilidad de recursos no renovables más abundantes, ya que con más energía seríamos capaces de explotar menas con menor concentración de minerales (Bardi 2008a). Otras innovaciones podrían implicar técnicas agrícolas más eficientes que aparecerían en el modelo como un mayor rendimiento en la producción alimentaria. Aun así, estas y otras posibilidades no cambian cualitativamente los resultados de las simulaciones. El colapso se produce, aunque más tarde en comparación con el escenario del caso base.

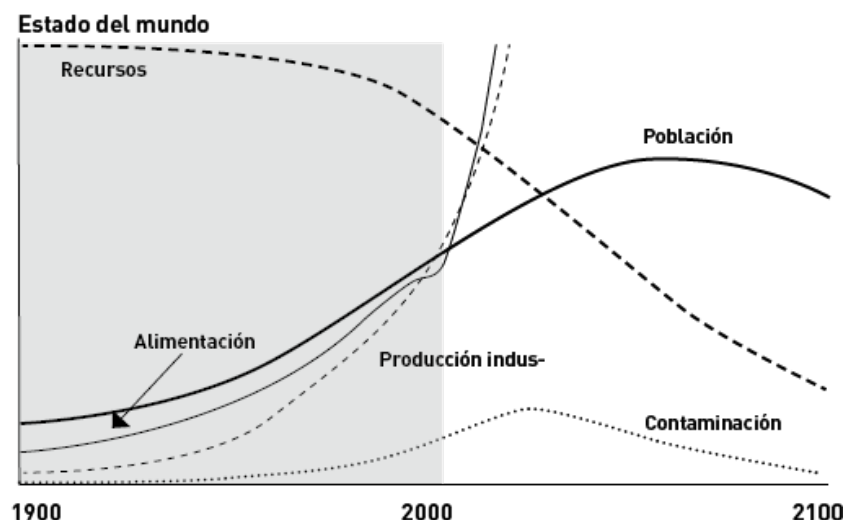
Incluso para el caso de “recursos minerales infinitos” (simulado como una eficiencia tecnológica para recuperarlos que siempre aumenta), el colapso es el resultado final de una contaminación descontrolada y de un descenso de los rendimientos agrícolas.

Se necesitan, no uno, sino muchos avances tecnológicos para generar un escenario donde el crecimiento de la economía y la contaminación sigan sin disminuir durante todo el siglo XXI. Este es el escenario al que los autores de LDC llamaron IFI-IFO para expresar “Infinito Dentro, Infinito Fuera” (“Infinity In,

Infinity Out”). Este escenario asume infinitos recursos no renovables, capacidad infinita de la agricultura para producir alimentos y capacidad infinita para disminuir la contaminación. Los resultados se pueden ver en el gráfico 2.

Gráfico 2

El escenario ‘IFI-IFO’ de LDC; una simulación que elimina los límites físicos asumiendo que los recursos son infinitos, al igual que la capacidad humana de luchar contra la contaminación



Fuente: Meadows et al. (2004), imagen por cortesía de Dennis Meadows.

Este funcionamiento no es realista, obviamente, pero puede ser útil para mostrar cómo se comporta el modelo bajo estas hipótesis. Como se ha mencionado anteriormente, la población

no crece simplemente en proporción a la disponibilidad de alimentos. La “transición demográfica” pone un límite al número de seres humanos en este planeta, incluso bajo estas hipótesis tan optimistas sobre la disponibilidad de recursos y el control de la contaminación.

Todos estos escenarios describen un sistema en el que la economía funciona de acuerdo con los supuestos del business as usual. Esto es, se supone que la gente continuará explotando los recursos naturales tan rápido como pueda, y que se reproducirá de acuerdo con el mismo comportamiento que han mostrado en el pasado. Sin embargo, estas hipótesis pueden ser modificadas. Esto equivale a suponer que los Gobiernos intervienen, o que los valores tradicionales pasan a promover el control de la natalidad con el objetivo de reducir el aumento de la población o de frenar la explotación de recursos.

Los efectos del control de la población fueron estudiados ya en la primera edición de LDC de 1972. La hipótesis más sencilla fue que la población pudiera mantenerse constante en los niveles de 1972. Claramente fue una hipótesis no realista; a pesar de ello, no evitaba el colapso de los sistemas industriales y agrícolas. Nuevamente, esto demuestra lo robusto que es el comportamiento del modelo. Los resultados del estudio de LDC más reciente (Meadows et al., 2004) son esencialmente los mismos que los de 1972. Ambos muestran que simplemente manteniendo constante la población, incluso aunque fuera posible, no se evitaría el colapso económico.

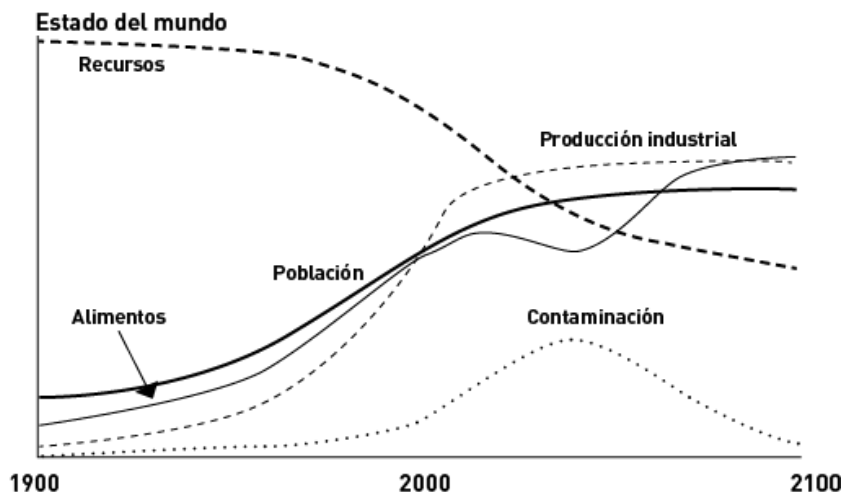
A pesar de ello, es posible ajustar los parámetros del modelo de tal manera que se obtenga un estado estable que no implique una pérdida (o que sea pequeña) de los niveles materiales para los seres humanos, por lo menos para la media. Con el fin de alcanzar este estado, es necesario frenar el crecimiento de ambos, población y producción industrial, y, unido a ello, es necesario el logro de considerables avances tecnológicos para luchar contra la contaminación y para reducir el problema de la erosión de los terrenos agrícolas. En otras palabras, la estabilización es posible pero solo mediante la estabilización de toda la economía y no solo de uno de sus elementos, como

puede ser la población. Por tanto, este escenario está relacionado con el concepto de “economía de estado estacionario” como lo expresó, por ejemplo, Herman Daly (1977) (gráfico 3).

El hecho de que los autores de LDC intentaran encontrar parámetros que condujeran a la “economía de estado estacionario” generó una gran controversia. Los defensores de la continuidad en el crecimiento veían la idea del sistema de “economía de estado estacionario” como imposible o como contraproducente, o ambos. Georgescu-Roegen, conocido por su intento de introducir la termodinámica en la teoría económica (Georgescu-Roegen, 1971) no creía que el sistema económico pudiera estabilizarse (Georgescu-Roegen, 1977, 1979a, b). Incluso recientemente, Gail Tilverberg (2011), por ejemplo, argumentó que el sistema financiero mundial estaba basado en la deuda y que la única manera de pagarla era continuar con el crecimiento.

Gráfico 3

El escenario de la ‘estabilización’ de LDC. Una simulación que asume una intervención acordada para controlar la población y para frenar la explotación de recursos. Con la ayuda de un progreso tecnológico razonable, estas hipótesis conducen a un escenario donde el colapso de la economía mundial no ocurre en el siglo XXI



Fuente: Meadows et al. (2004), cortesía de Dennis Meadows.

No obstante, también es cierto que los sistemas complejos que reciben un flujo de energía de fuentes externas tienden a alcanzar un estado estacionario o, por lo menos, a oscilar alrededor de un estado constante; una condición denominada homeostasis (Lotka, 1925; Karnani y Annala, 2009). El sistema mundial estudiado por LDC no es una excepción; los cálculos presentados muestran una tendencia hacia la estabilización a finales del siglo XXI aproximadamente. Eso quizá conduciría a un estado estacionario en el siglo XXII correspondiente con una sociedad agrícola, con un nivel posiblemente comparable al de los siglos XVIII o XVII. Pero la búsqueda emprendida por los autores de LDC en 1972 no trataba sobre ese tipo de estado estacionario, trataba de un estado estacionario relacionado con la producción industrial y agrícola, así como con la población, comparable a la del momento presente. Obviamente, los modelos indicaban que el sistema mundial, por sí solo, no lograría semejante estado. Aquello llevó a los autores a proponer la modificación de los parámetros del sistema de tal forma que se forzase que el sistema alcanzase el estado deseado. Este enfoque suponía cambios drásticos en la forma de funcionar del sistema económico, algo que probablemente

requeriría una intensa intervención del Gobierno o, de todas formas, un cambio considerable en la manera en que se toman las decisiones en el mundo. Este fue uno de los elementos por los que los autores de LDC se hicieron impopulares más adelante.

En cualquier caso, lograr tales condiciones fue posible en las tres fechas en las que se realizaron las simulaciones (1972, 1992, 2004), pero resultaba cada vez más difícil dado que el sistema económico mundial se iba quedando sin recursos progresivamente y la contaminación permanente se hacía más relevante. Con una mayor población y con el creciente nivel de agotamiento de hoy (2011), quizá no sea ya posible encontrar un nuevo conjunto de limitaciones que estabilicen el sistema.

Independientemente de si la estabilización es posible o no, el propio hecho de que los autores de LDC buscaran ese resultado implica un juicio sobre lo que es bueno para nuestra sociedad. La opinión de los autores de LDC y de su patrocinador, el Club de Roma, era que la estabilización era algo favorable que obtener. Otros (por ejemplo, Boyd, 1972; Vajk, 1976) han utilizado el modelo World3 para encontrar un futuro diferente que, a su juicio, es deseable. Este es cómo sería posible mantener el crecimiento económico para siempre. Se trata de un uso perfectamente legítimo del modelo, aunque basado en una valoración diferente de lo que el futuro de la humanidad debería ser.

Los dos informes, el de Forrester (1971) y el del grupo de LDC (Meadows et al., 1972) no fueron los únicos dedicados a la modelización del mundo en aquel momento. Otros grupos se implicaron en la misma tarea utilizando métodos similares o diferentes. Algunos intentos de modelización del mundo aparecieron incluso antes que el primer LDC. Un ejemplo de ello es el libro de John Harte y Robert Socolow, *Patient Earth* (Harte y Socolow, 1971). Estos autores, sin embargo, no utilizaron la dinámica de sistemas. Podríamos citar también *Overshoot*, de Catton (1982), que se escribió a principios de los años setenta pero que se publicó en 1982. En su libro, Catton no utilizaba los métodos propios de la dinámica de sistemas

pero el concepto de “extralimitación” (overshoot) se basa en conceptos de la dinámica. Se llevaron a cabo otras simulaciones en el libro *Beyond Oil*, de Gever et al. (1986), el cual generó resultados bastante similares a los de LDC.

El Club de Roma patrocinó directamente algunos estudios que fueron considerados como actualizaciones de LDC. Uno de ellos fue escrito por Mihajlo Mesarovich y Eduar Pestel (1974) y se tituló *Mankind at the Turning Point: The Second Report to The Club of Rome*. Este trabajo fue el paso lógico que había que dar después del primer informe. Intentó ampliar los cálculos de LDC, en esta ocasión, desagregando las distintas regiones del mundo, que se dividió en diez áreas geográficas. Los autores descubrieron que el colapso predicho por el estudio de LDC iba a ser regional antes que global y que se produciría primero en Sudamérica y en el sureste asiático. Otro de los estudios patrocinados por el Club de Roma fue llevado a cabo por el economista holandés y ganador del Premio Nobel, Jan Tinbergen, cuyo trabajo se tituló *RIO, Reshaping the International Order* (1977). No obstante, su estudio destacó el crecimiento económico en lugar de los límites y, finalmente, el Club de Roma le retiró su apoyo.

Otros estudios y documentos basados en la modelización del mundo no fueron patrocinados directamente por el Club de Roma, pero se inspiraron en el estudio de LDC. Varios de estos modelos son descritos en el libro *Groping in the dark* (Meadows et al., 1982). Entre estos estudios, por ejemplo, en 1977, Amílcar Herrera, de la Fundación Bariloche de Argentina, utilizó la dinámica de sistemas para estudiar el futuro de la economía Latinoamericana (Herrera, 1977). Este trabajo pretendía refutar las predicciones de colapso del estudio de LDC, pero a pesar de algunos supuestos de entrada muy optimistas, no fue posible desarrollar escenarios convincentes de este tipo. También se puede mencionar el *Global 2000 Report to the President* para el presidente Carter, escrito por un equipo de autores bajo la dirección de Gerald O. Barney (1980). Este fue el primer (y hasta ahora el último) informe encargado por un Gobierno nacional importante sobre el futuro económico, demográfico, de los recursos y

medioambiental del mundo. Los resultados fueron en general congruentes con los de LDC pero, a pesar de vender más de 1,5 millones de copias en ocho idiomas, este estudio dejó poca huella en el debate.

En general, el esfuerzo en la modelización del mundo que había comenzado en la década de los sesenta flaqueó a finales de la década de los setenta y en la década de los ochenta por falta de recursos y como consecuencia de la opinión cada vez más negativa sobre LDC. Los autores de LDC siguieron trabajando en sus modelos y publicaron versiones actualizadas de sus simulaciones del mundo en 1992 y en 2004. Sin embargo, la modelización del mundo se abandonó en gran medida durante más de dos décadas y, 40 años después de la primera publicación de LDC, nos encontramos frente a un futuro para el que no tenemos ningún plan.

CAPÍTULO 7

CRÍTICAS A ‘LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO’

Thomas Huxley (a quien le gustaba ser definido como “el bulldog de Darwin”) dijo que “es el destino habitual de las nuevas verdades comenzar como herejías y terminar como supersticiones”. Hay muchos casos en los que un excesivo conservadurismo en la ciencia ha evitado que las ideas nuevas (“herejías”) fueran adoptadas y ha mantenido las ideas antiguas (“supersticiones”) vivas por demasiado tiempo. El conservadurismo, sin embargo, no constituye una característica negativa de la ciencia. Este es útil, en realidad esencial, para mantener intactos los métodos centrales de la ciencia y eliminar el entusiasmo inapropiado, que no está basado en pruebas suficientes. El problema es: ¿qué constituye una genuina innovación y qué una novedad que pronto desaparecerá?

En la práctica se espera que una teoría científica nueva supere una estricta revisión antes de ser adoptada. La revisión será más estricta cuanto más radicalmente innovadora sea la nueva teoría y será especialmente severa si los que la proponen no pertenecen a la reconocida elite en el campo del que se trate; o peor, si son desconocidos que provienen de un campo científico diferente. En algunos casos, es bien conocido que una nueva teoría puede afianzarse en la ciencia solamente cuando sus iniciales opositores se jubilan y una nueva generación de científicos toma el relevo.

En el caso de la aplicación de la dinámica de sistemas a los sistemas sociales y económicos, el trabajo presentado por Forrester (1971) y por el grupo de LDC (Meadows et al., 1972) contaba con todas las características de una innovación radical. Unido a esto, el trabajo fue propuesto por personas que no tenían “pedigrí” en el campo de los estudios económicos o sociales. Como se puede imaginar, el debate que se produjo resultó ser, por decirlo de un modo amable, duro. Después de la publicación de LDC en 1972, los comentarios

llegaron de diferentes campos de la ciencia y muchos fueron favorables, es más, entusiastas. La gente estaba impresionada por la extensión y profundidad de los estudios, por el enfoque innovador y por el uso de computadoras, lo que en ese momento suponía una novedad. A modo de ejemplo, Robert Townsend, autor de *Up the Organization* (1970), escribió sobre Los límites del crecimiento (citado en Simmons, 2000).

Los Límites del crecimiento ha sido noticia en todo el mundo. Su onda expansiva ha provocado que nuestras más apreciadas hipótesis se hayan venido abajo. Es un libro que podemos ignorar solo por nuestra cuenta y riesgo.

Si este libro no deja con la boca abierta a todo aquel que puede leer sin mover los labios, en ese caso, la tierra está kaput.

Estas primeras reacciones entusiastas raramente se basaban en un profundo examen del estudio, puesto que muy pocas personas, al principio, contaban con la capacidad técnica y los medios para replicar el trabajo de Forrester y del equipo de LDC. Sin embargo, muchos investigadores intentaron adaptar los nuevos métodos a sus propios campos de estudio y examinar con más detalle el tema de la modelización del mundo. Un buen ejemplo de este enfoque es el artículo de 1973 de John Bongaarts (1973), un demógrafo que se fijó en el subsistema de población del modelo World3. Hay otros ejemplos de las reacciones positivas a LDC, incluso entre economistas, como es el caso del artículo de Brown et al. (1973) en *Oxford Economic Papers*.

Por ello, la idea de que LDC fue motivo de mofa por ser un estudio obviamente imperfecto, es una de las muchas leyendas equivocadas que le rodean hoy. No obstante, también es cierto que la primera aparición de la modelización del mundo generó una fuerte reacción negativa, especialmente proveniente de los economistas. El capítulo presente está dedicado a examinar las críticas a LDC que se basaron (o que afirmaron basarse) en argumentos científicos. La reacción más específicamente política se examinará en otro capítulo.

Tres economistas, Peter Passel, Marc Roberts y Leonard Ross

dispararon la primera andanada contra el estudio de LDC el 2 de abril de 1972, en un artículo que apareció en el New York Times. La cualificación académica de los autores y la gran difusión del periódico le dieron al artículo un peso importante.

Fijándose hoy en el artículo de Passel, Roberts y Ross, se puede apreciar que era muy limitado. En dos páginas de texto, los autores lo único que hicieron fue atacar LDC a través de una serie de declaraciones de incredulidad, principalmente focalizadas en los datos de entrada que fueron tachados de “demasiado pesimistas”. Muchas de estas críticas se produjeron por una mala interpretación del significado de algunas tablas del segundo capítulo del libro de LDC que describía la duración estimada de algunos recursos minerales en varias hipótesis. Passel y los demás lo tomaron como una “predicción”, mientras que en el texto parecía claro que se trataba de un ejemplo ilustrativo de las posibles tendencias de algunas hipótesis específicas que los propios autores definieron como “no realista”. Años después, esta errónea interpretación fue recogida nuevamente (Bailey, 1989) y utilizada para atacar políticamente al estudio de LDC, pero en aquel momento esa crítica pasó casi desapercibida.

La reacción de Passel et al. es la típica “reacción visceral” a LDC por parte de muchos economistas. Ya en 1971, Martin Shubik (1971) había comentado el estudio World Dynamics de Forrester (1971) en Science diciendo: “¿Para qué sirve este libro? Su contenido científico es virtualmente cero”. Wilfred Beckerman (1974) arremetió contra LDC en un artículo que apareció en Oxford Economic Papers diciendo que era una “descarada e insolente tontería”. El economista de Yale, Henry C. Wallich, catalogó el libro de “tontería irresponsable” en su editorial del 13 de marzo de 1972 en Newsweek. John Koheler escribió en la publicación Journal of Politics (Koehler, 1973) que “si la cuestión es simplemente observar que como t se hace mayor con el paso del tiempo, aet se hace mayor, en ese caso, una gran parte de sus 205 páginas son innecesarias”.

Estas críticas tempranas tienen solamente un interés modesto hoy, salvo como indicador de la reacción hostil de los

economistas al enfoque de LDC. Pero con el tiempo, más personas se familiarizaron con la teoría que se encontraba tras LDC y esto llevó a intentos más serios de evaluaciones críticas del estudio. Dos primeros trabajos son especialmente importantes, ya que tuvieron un impacto considerable sobre el debate. Uno fue elaborado por el denominado Sussex Group, también conocido como la Unidad de Investigación sobre Políticas de Ciencia y Tecnología (SPRU) de la Universidad de Sussex en Inglaterra y el otro, por William Nordhaus, de la Universidad de Yale.

Vamos a examinar primero el trabajo del Sussex Group (Cole et al., 1973), que hoy en día permanece como uno de los intentos más serios jamás realizados de llevar a cabo una completa evaluación del modelo de LDC. El grupo SPRU de la Universidad de Sussex era un equipo interdisciplinario que incluía no solo a economistas, sino también a físicos, matemáticos, historiadores y a otros especialistas. Su estudio sobre LDC apareció en 1973 en Gran Bretaña con el título *Models of Doom*. La edición americana del libro dejó un capítulo para que el grupo de LDC respondiera a las críticas, pero no fue así en la edición británica. El no dar a los autores criticados la oportunidad de responder a las críticas constituye, desde luego, una ruptura de las reglas aceptadas para este tipo de confrontación intelectual. He aquí, uno de los muchos indicadores de que el debate sobre LDC fue más duro de lo habitual.

La publicación de *Models of Doom* contiene un total de 14 ensayos, nueve de los cuales están dedicados a las valoraciones técnicas de LDC con un total de 134 páginas escritas por 9 autores distintos. Resulta imposible discutir aquí todos los detalles de este estudio, pero los puntos más importantes abordados en él se pueden resumir diciendo que las críticas contra LDC se basaban en dos cuestiones: la primera era que los autores habían sido demasiado pesimistas en sus hipótesis sobre los parámetros de entrada del modelo. La segunda, que había fallos fundamentales en el modelo utilizado.

En el caso del primer punto, hipótesis pesimistas, muchas de

las afirmaciones que se pueden leer en Models of Doom parecen hoy simplemente ingenuas. Un buen ejemplo es el artículo sobre los recursos agrícolas de Pauline Marstrand y K. R. L. Pavitt, donde se sugiere que, para abastecer al mundo de suficiente comida, basta con cultivar las tierras continentales de Australia que consideraban “infrautilizadas”. Parece algo así como que todo lo que se necesita para transformar el desierto australiano en tierra fértil es cortar algunos arbustos, pulverizar algunos pesticidas e instalar dispositivos de fertilización y riego. Por lo menos, la devastación causada a la agricultura convencional australiana en 2010-2011 por la sequía y las inundaciones debería dejar a un lado esta idea. Aunque para una descripción detallada sobre cómo algunos sueños sobre la abundancia fácil se pueden romper, vale la pena leer el capítulo sobre Australia en Collapse, de Jared Diamond (2005). La tierra australiana ha resultado severamente dañada por las políticas gubernamentales que apoyaron la destrucción de la vegetación autóctona para remplazarla por cultivos. La salinización y la degradación de la tierra fueron los resultados. El fenómeno de la degradación de la tierra causada por la acción humana ocurre en cualquier lugar del mundo (Ponting, 2007).

En Models of Doom podemos encontrar un enfoque excesivamente optimista similar aplicado a los recursos minerales. En el capítulo de William Page, dedicado al subsistema de los recursos no renovables, leemos que la corteza terrestre “tiene una profundidad de 25-40 millas”. El autor parece creer seriamente que los minerales se pueden extraer a semejantes profundidades, pero aún hoy, las mayores perforaciones que se han realizado, los pozos petrolíferos, no tienen una profundidad superior a 10 km (6-7 millas) aproximadamente y, normalmente, es inferior. Por otro lado, las minas no alcanzan semejantes profundidades, la mayoría de las veces ni siquiera remotamente. En algunos casos, los depósitos de mineral explotable (“menas”), son el resultado de procesos hidrotermales que ocurren en la superficie o a bajas profundidades. Excavar a mayor profundidad no es la solución para paliar la escasez de minerales.

A pesar de estos fallos obvios, la discusión sobre los recursos en *Models of Doom* no está completamente anticuada. Por ejemplo, vale la pena leer el capítulo sobre los recursos energéticos de A. J. Surrey y de A. J. Broomley, por su precisa evaluación de las reservas de combustibles fósiles existentes. Ahora bien, existe un problema básico en esta sección: los cálculos que se presentaron en el estudio de LDC tuvieron en cuenta una amplia gama de supuestos, algunos tan optimistas que solo pueden ser tachados de no realistas. Por lo tanto, afirmar que los recursos minerales o agrícolas pueden ser más abundantes que lo asumido en el modelo del “caso base”, es, como mucho, una crítica marginal de LDC y no afecta a la validez del estudio.

El siguiente punto sobre el cual el grupo de los SPRU construyó una crítica de LDC es más interesante: la validez del modelo en sí mismo. Aquí, el trabajo de los dos autores implicados en este análisis, el físico H. S. D. Cole y el matemático R. Curnow, permanece en nuestros días como uno de los más detallados exámenes críticos de los modelos World3 (Meadows et al., 1972) y World2 (Forrester, 1971).

A pesar de la cualificación y de la experiencia de los autores, algunos comentarios de Cole y Curnow pusieron de relieve lo difícil que era (y todavía es) para personas no formadas en la dinámica de sistemas, entender el propósito y la estructura del modelo dinámico. Por ejemplo, afirman lo siguiente: “Pero si él (Forrester) hubiese iniciado la trayectoria de su modelo en 1880 con valores iniciales basados en sus argumentos de *World Dynamics*, el colapso predicho por la trayectoria estándar se habría adelantado 20 años. Y si hubiera empezado el modelo en 1850, el colapso se habría predicho para 1970”. Obviamente, como se señaló en la respuesta de los autores de LDC en la edición americana, si hubieran elegido como fecha de inicio para sus simulaciones, tal y como se dijo, el año 1850, habrían seleccionado valores para las constantes del modelo que se adaptarían a los datos históricos. Por ello, el colapso habría tenido lugar en la misma fecha en las simulaciones.

La misma percepción errónea de la estructura de un modelo dinámico puede verse cuando Cole y Curnow manifiestan: “En el modelo World3, es importante indicar que el efecto del incremento en el gasto en equipos para combatir la contaminación es el aumento del capital utilizado y de la contaminación”. Esto es cierto, pero sería una crítica solamente si se pretendiera querer decir que el único efecto de la fabricación de equipos para combatir la contaminación es incrementar la contaminación. Este no es, obviamente, el caso. En el modelo, la fabricación de este tipo de equipos debe ser considerada también como un elemento que disminuye la contaminación. No sería sorprendente, en cualquier caso, que algo diseñado para combatir la contaminación fuera a convertirse en la práctica en algo que crea más de la que elimina.

A pesar de estas malinterpretaciones, aún hoy merece la pena leer el examen exhaustivo realizado por Cole y Curnow sobre el modelo World3. Muestra de ello es que observaron que el modelo World3 presentaba problemas al retroceder en el tiempo. Se dieron cuenta de que, yendo hacia atrás, el modelo mostraba un agudo crecimiento de la producción industrial alrededor de 1880. Visto en la dirección normal de movimiento del tiempo, aquello habría aparecido como una disminución, en realidad una catástrofe, que evidentemente no tuvo lugar en la historia real.

Cole y Curnow habían identificado, por primera vez, un problema general de los modelos dinámicos, la capacidad de retroceder (backcasting). Es un problema que ha sido examinado en varios estudios posteriores (véase, por ejemplo, Coyle, 1983). Hoy en día, se cree normalmente que un buen modelo debería funcionar en ambos sentidos, hacia delante y hacia atrás, pero también está claro que no se trata de una propiedad crucial. El modelo World3 no había sido concebido para funcionar hacia atrás y por ello no sorprende el que no lo pueda hacer. La cuestión es si ese comportamiento puede afectar negativamente a los resultados de los cálculos. En este punto, Cole y Curnow fueron incapaces de demostrar que las inestabilidades de backcasting en World3 generasen problemas

significativos cuando el modelo se utilizaba de forma normal.

Entonces, finalmente, ¿qué es lo que Cole y Curnow concluyeron? Sobre todo, su crítica más importante, continuamente repetida, está relacionada con el valor del modelo para representar verdaderamente el mundo real. En otras palabras, Cole y Curnow discuten cómo es posible validar el modelo de LDC y sostienen que semejante validación no es posible. Por ello, el modelo, en su opinión, es imperfecto. Pero esta conclusión depende de lo que exactamente se entienda por “validación”.

Para un físico, la validación de un modelo consiste en que los resultados calculados se ajusten a los datos experimentales. La repetición de pruebas sobre diferentes conjuntos de datos se realiza habitualmente. Si el ajuste se estima estadísticamente significativo, en ese caso el modelo se considera validado para el sistema que se está estudiando. Esto es posible, sin embargo, principalmente para el caso de modelos lineales. Por ejemplo, la ley de la gravedad de Newton puede ser fácilmente validada mediante la medición del movimiento de un cuerpo en un campo gravitatorio. Una vez que esto se ha llevado a cabo para un gran número de sistemas, la validación del modelo deja de ser cuestionada.

El problema con los sistemas complejos, como ocurre con los socioeconómicos, es que el comportamiento de estos es, en general, no repetible, y que, a menudo, los datos disponibles son limitados. En algunos casos es posible mostrar que los modelos dinámicos simples describen sistemas históricos razonablemente bien, como se indicó en un capítulo anterior para el caso de la captura de ballenas (Bardi y Lavacchi, 2009). No obstante, esto no prueba que un modelo dinámico diferente y mucho más complejo pueda describir la economía mundial a lo largo del siglo XXI, especialmente si la ejecución del modelo se lleva a cabo en el siglo XX.

Un físico tenderá a evaluar todos los modelos como si estuvieran describiendo un sistema lineal repetible. Con frecuencia considerará arbitrario, si no carente de valor, el enfrentarse a un sistema no lineal e irrepetible, y que además

se encuentre aún evolucionando. Esta parece ser la opinión de Cole y Curnow sobre el modelo World3, pero el punto de vista del científico de sistemas es diferente. John Sterman (Sterman, 2002) ha examinado este tema (p. 521) y manifiesta:

Porque todos los modelos son incorrectos¹, rechazamos la noción de que los modelos puedan ser validados en el sentido de la definición lexicográfica de “establecer la veracidad”, en lugar de centrarse en crear modelos que sean útiles en el proceso de pruebas, en la comparación continua del modelo frente a todos los datos de todo tipo y en la continua interacción de experimentos con el mundo virtual del modelo y experimentos en el mundo real. Argüimos que centrarse en el proceso de modelización más que en los resultados de un modelo en particular acelera el aprendizaje y conduce a mejores modelos, mejores políticas y mejores oportunidades de implementación y mejora de los sistemas (Sterman, 2002).

Así pues, se podría decir que nos enfrentamos a un choque de absolutos entre la forma de ver el mundo de los físicos y la de los científicos de sistemas. Los físicos buscan “leyes” que describan el comportamiento de los sistemas y que puedan ser utilizadas para predecir. Los científicos de sistemas persiguen la comprensión de cómo los sistemas complejos funcionan.

Tal vez, alguien pueda decir que todos los modelos son incorrectos, pero todos los modelos pueden ser útiles en tanto en cuanto se tomen por lo que son: maneras de comprender los sistemas, un concepto que se puede definir como “la manera de formalizar las hipótesis” (Hall y Day, 1977). Visto de este modo, la pregunta correcta a formular acerca del modelo World3 de LDC (o del modelo World2 de Forrester) no es si el modelo puede ser probado para describir la realidad o no, sino qué modelos alternativos se pueden concebir y cómo los resultados obtenidos difieren. En este sentido, Models of Doom no proporciona alternativas y por ello es una débil crítica de estos modelos del mundo.

Según se desprende de este resumen, el debate de Models of

Doom fue más duro que el normal debate científico, pero en su totalidad sigue siendo aceptable. Los autores de varios capítulos del libro expresaron sus opiniones, apoyaron sus afirmaciones sobre los datos y citaron sus fuentes. El equipo de LDC, por su parte, tuvo la oportunidad de responder (al menos en la edición americana del libro). Partiendo de esta base, se podría haber esperado que los intercambios hubieran dado lugar a, por lo menos, una definición de las áreas de desacuerdo y, tal vez, mejores modelos, pero esto no ocurrió. En su lugar, el debate degeneró en insultos y acusaciones políticas de una forma parecida a la mayor parte del debate sobre el clima que se da hoy. En parte, esto ya estaba ocurriendo en *Models of Doom* que contenía una sección con el siniestro título de “el bagaje ideológico”, la cual se examinará en otro capítulo.

Llegados a este punto, se puede examinar ahora el trabajo de William Nordhaus, que surgió del debate como una de las mayores críticas al estudio de LDC y, en general, a la dinámica de sistemas como método para modelizar los sistemas económicos. En 1973, Nordhaus publicó un artículo titulado “World dynamics: measurements without data” (Nordhaus, 1973), que tenía como blanco el libro de Forrester (Forrester, 1971), si bien está claro que el ataque de Nordhaus incluía en general el trabajo de LDC.

El artículo de Nordhaus abarca 27 páginas y contiene mucho material que merece la pena discutir, pero está fuera de nuestro alcance entrar en todos los detalles aquí. A Forrester le llevó 21 páginas completas su respuesta, que fue publicada en *Policy Sciences* (Forrester et al., 1974). Para lo que aquí concierne, se puede resumir la crítica de Nordhaus creando tres categorías básicas: 1) acusaciones *ad personam*, 2) declaraciones de incredulidad sin fundamento y 3) crítica cuantificable.

Para la primera categoría, se puede coger como ejemplo la acusación de “falta de humildad” hecha contra Forrester. La esencia de esta acusación es que, llevar las simulaciones mundiales hasta el final del siglo XXI es demasiado ambicioso

como para tener sentido. Esta es una opinión legítima pero no algo que pueda ser evaluado en base a un criterio objetivo. En este punto, sin embargo, conviene señalar que el propio Nordhaus, posteriormente, cometiera el mismo fallo intelectual, de acuerdo a su propia definición, con su modelo DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy) (Nordhaus, 1992b).

La segunda categoría de la crítica de Nordhaus, “declaraciones de incredulidad”, recoge presuntas deficiencias de la modelización del mundo, las cuales, sin embargo, no están sustentadas en pruebas reales. Una de tales afirmaciones es, por ejemplo, la que a continuación se reproduce (p. 1166) y en la que podemos leer que, de acuerdo con Nordhaus, en el modelo de Forrester:

[...] descubrimos increíbles rendimientos de escala para la economía: si doblamos el número de altos hornos y el número de yacimientos minerales, la producción de arrabio se cuadriplica.

Pero en ninguna parte de su artículo Nordhaus demuestra que el modelo de Forrester produzca tales resultados, obviamente irreales. De hecho, Nordhaus se fija simplemente en una de las varias ecuaciones del modelo, sin darse cuenta de que el resultado de cada ecuación se verá modificado por la interacción con las demás ecuaciones y esto asegurará unos rendimientos de escala correctos. Esta es la esencia del pensamiento sistémico: las partes interactúan.

Considérese ahora la acusación de “mediciones sin datos”, que es la parte más importante del artículo, y la que le da el título. Esta es una crítica cuantificable: si se puede demostrar que Forrester (o el grupo de LDC) estaba realizando modelos que son totalmente incapaces de describir la realidad, entonces es correcto desechar su trabajo por inútil e irrelevante.

En *World Dynamics* (1971) y en *LDC* (1972), una de las cosas que inmediatamente saltan a la vista es que los datos históricos mundiales no aparecen en los escenarios calculados. A un lector acostumbrado al enfoque habitual del “ajuste” de datos, esto le produce una mala impresión. ¿Es posible que los autores de estos estudios fueran tan arrogantes que no les importara la comparación de sus resultados con los datos del mundo real?

No obstante, un examen más cuidadoso del texto de ambos estudios muestra que los autores sí afirman que sus cálculos se calibraron los datos históricos reales. No mostrar estos datos en las cifras fue una elección cuyo fin era mejorar la claridad. Como elección, puede ser criticada pero no ignorada.

Cabe mencionar que ninguno de los autores participantes en el estudio de *Models of Doom* (Cole et al., 1973), examinado anteriormente, sintió que el trabajo de Forrester (o el libro de *LDC*) podía criticarse en los términos utilizados por Nordhaus. En el capítulo de Cole, “The Structure of the World Models” (p. 31 de Cole et al., 1973), los datos utilizados en los modelos son examinados en detalle. Algunas de las aproximaciones utilizadas son criticadas y, en algunos de los casos, se dice que los datos son insuficientes para los propósitos del modelo. Pero en ningún momento se afirma que los modelos fueran “carentes de datos”.

Entonces, está claro que los modelos *World2* (de Forrester) y *World3* se cotejaron con los datos históricos, por lo menos dentro de unos límites. Sobre esto, aunque ambos, Forrester y el equipo de *LDC*, hicieron un esfuerzo por elegir los parámetros del modelo sobre la base de los datos históricos, también consideraron que sus modelos tenían un objetivo heurístico más que un objetivo explícitamente predictivo. Por ello, no era necesario utilizar para sus escenarios un riguroso procedimiento de ajuste de datos del tipo de los utilizados en los estudios de física. Nuevamente, esta es una posición que puede ser criticada, pero no ignorada.

El propio Forrester describe esta postura en su libro *World Dynamics* (Forrester, 1971). En la página 14 (segunda edición)

dice:

No hay nada nuevo en utilizar modelos para representar sistemas sociales. Se usan modelos constantemente, cada persona en su vida personal y en su vida comunitaria utiliza modelos para tomar decisiones. La imagen mental que cada individuo tiene en su cabeza sobre el mundo que le rodea constituye un modelo. Uno no tiene en su cabeza una familia, un negocio, una ciudad, un gobierno o un país. Tiene solo conceptos y relaciones seleccionadas que utiliza para representar el sistema real [...] Mientras que ninguno de los modelos informáticos de los sistemas sociales existentes hoy puede ser considerado más que preliminar, muchos están comenzando ahora a mostrar características de comportamiento de los sistemas reales.

Los científicos de sistemas tienen un enfoque estructurado sobre este punto, como describe, por ejemplo Sterman (Sterman, 2002: 523).

[...] es importante utilizar métodos estadísticos apropiados para estimar parámetros y valorar la capacidad del modelo para replicar los datos históricos cuando los datos numéricos están disponibles [...] La definición rigurosa de constructos, los intentos de medirlos y la utilización de los métodos más apropiados para calcular sus magnitudes son importantes antídotos contra el empirismo informal, las formulaciones confusas y las conclusiones erróneas que normalmente sacamos de nuestros modelos mentales. Ignorar datos numéricos o no utilizar herramientas estadísticas cuando es apropiado demuestra descuido y pereza.

Desde luego, el hecho de que Sterman crea que es necesario

criticar a aquellos modelizadores que “no logran utilizar las herramientas estadísticas” indica que el problema existe. Modelizar los sistemas socioeconómicos utilizando las herramientas de la dinámica de sistemas no es inmune a los sesgos que son fáciles de ver en los habituales debates políticos.

Por ello, teniendo en cuenta todo esto, ¿cómo se debería entender la crítica de Nordhaus? Si se concibe en el sentido de que los modelos de dinámica de sistemas proporcionan solo aproximaciones del comportamiento histórico del mundo, entonces es una crítica débil que apenas justifica la frase de “mediciones sin datos”. Este punto debería haber estado claro para el propio Nordhaus, que trató de basar su crítica a través de la siguiente afirmación referida al modelo World2 de Forrester:

[...] contiene 43 variables conectadas a 22 relaciones no lineales (y muchas lineales). Ni una sola de las relaciones o variables se extrae de datos reales o estudios empíricos [cursiva en el original].

Vamos a analizar esta frase. En primer lugar, el modelo de Forrester, como todos los modelos, contiene tres elementos: las relaciones matemáticas o ecuaciones, las variables (poblaciones, recursos, etc.) y las constantes que aparecen en las ecuaciones y que determinan el comportamiento cuantitativo del modelo. Nordhaus habla aquí de dos de estos elementos: variables y relaciones, pero no del tercero, las constantes. Claramente, tenía conocimiento de que Forrester estaba utilizando constantes derivadas de datos reales, pero entonces, ¿qué significa que “Ni una sola de las relaciones o variables se extrae de datos reales o estudios empíricos”?

Evidentemente, Nordhaus piensa que las ecuaciones y las variables del modelo deberían haber sido determinadas mediante el ajuste de los datos experimentales. Este es un

enfoque que a menudo se conoce con el nombre de “econometría”. Este término no describe un tipo específico de modelo, sino que se refiere a una serie de métodos y técnicas utilizadas para ajustar un conjunto de datos, habitualmente una serie temporal, al modelo (Franses, 2002). La econometría se puede utilizar para probar un modelo, pero en algunos casos es “el mejor ajuste” de varios modelos lo que determina cuál se va a elegir. Esta es una técnica legítima pero que puede fácilmente conducir al modelizador por un mal camino si los elementos físicos no son suficientemente comprendidos.

En cualquiera de los casos, el “procedimiento de mejor ajuste” dice poco sobre la física del sistema que está siendo estudiado. Piénsese en la ley de Newton de la gravitación universal. Los científicos que trabajaron antes que Newton en los movimientos planetarios, desde Tolomeo a Johannes Kepler, habían utilizado básicamente un procedimiento de “ajuste de datos” para escribir sus observaciones, pero nunca habrían podido deducir la ley de la gravitación universal utilizando este enfoque. Newton ideó una ley que creyó plausible, quizá le asaltó la idea al ver caer una manzana de un árbol, pero esto difícilmente se consideraría ajuste de datos. Entonces, calculó el movimiento de los planetas de acuerdo a su ley y se dio cuenta de que los cuerpos simulados que orbitan alrededor del Sol describirían órbitas elípticas tal y como se observó para el caso de los planetas. En este punto, Newton podría variar la constante g en su ley, de tal forma que fuera posible utilizar la ecuación para describir el movimiento real de los planetas.

Así que, si la crítica de Nordhaus a Forrester fuera a ser aplicada a la ley de gravitación de Newton, entonces se debería criticar porque no “se extrae de datos reales o estudios empíricos”. Se podría, de hecho, criticar a Newton por llevar a cabo “mediciones sin datos”.

Por supuesto, el modelo de Forrester es mucho más aproximado y tentativo que la ley de Newton de la gravitación universal. Sin embargo, las consideraciones sobre la validación del modelo permanecen válidas. Por ello, para probar su opinión de “mediciones sin datos”, Nordhaus necesitaría hacer

más, necesitaría demostrar que el modelo de Forrester es totalmente incapaz de describir la realidad.

También, Nordhaus monta su artículo para “evaluar la hipótesis específica en el subsector de World Dynamics” (p. 1160). El análisis del subsistema de la población es crucial en este estudio. En la figura 3 de este artículo, Nordhaus traza los datos sobre la tasa de natalidad en función del Producto Interior Bruto (PIB) de varios países junto a lo que él considera que son los resultados producidos por el modelo de Forrester (gráfico 1).

A partir de esta figura, parecería que la hipótesis de Forrester estaba completamente equivocada y esta es, de hecho, la conclusión de Nordhaus. Pero ¿cuál es la curva que Nordhaus llama la “hipótesis de Forrester”? En el artículo leemos que esta curva es “la respuesta, asumida por Forrester, de la población para el aumento del consumo no alimentario per cápita cuando la densidad de la población, la contaminación y el consumo per cápita alimentario se mantiene constante” [enfaticado añadido].

Sin embargo, esta no es la hipótesis de Forrester. Nordhaus había simplemente cogido una de las ecuaciones del modelo de Forrester y la había trazado manteniendo todos los parámetros constantes excepto uno (el “consumo no alimentario” que equipara al PIB). Pero el modelo de Forrester nunca se concibió para funcionar de esta manera.

Este punto merece ser explicado con más detalle. Considérese un modelo simple Lotka-Volterra, tal y como se describía en un capítulo anterior, en el que los dos stocks son zorros y conejos. Utilizar el enfoque de Nordhaus para este modelo, significaría coger una de las dos ecuaciones, digamos la que describe el flujo de conejos, y veamos cómo se comporta cuando “todas las demás variables se mantienen constantes”, en este caso, el número de zorros. Esta es la ecuación, donde R es el número de conejos y C el número de zorros.

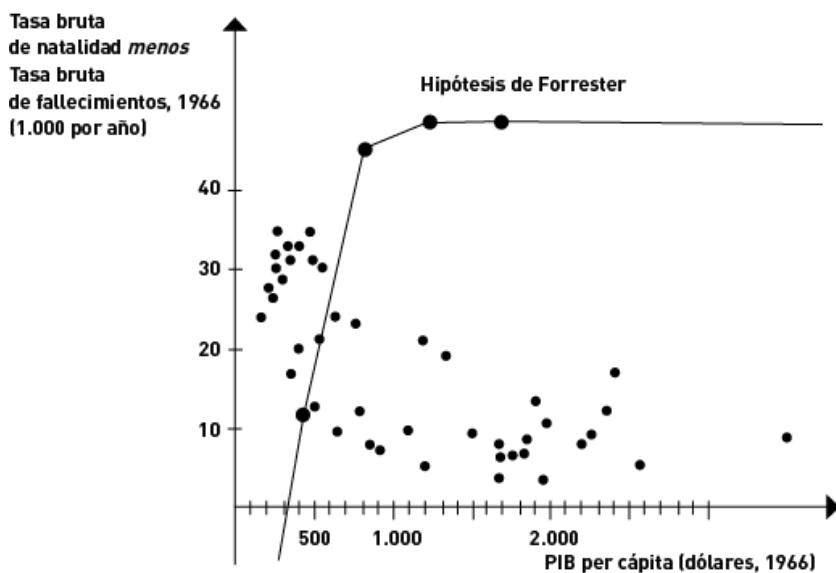
$$R' = -k_1 CR + k_2 R$$

Si C es una constante, la ecuación se simplifica a:

$$R' = kR$$

Gráfico 1

Esta figura, tomada de Nordhaus (1973), intenta demostrar que el modelo del mundo de Forrester (Forrester, 1971) es incapaz de describir datos históricos del crecimiento de la población



Fuente: cortesía de Wiley.

Dependiendo de si la constante k es positiva o negativa, R bien crecerá exponencialmente hacia el infinito o bien tenderá a cero con el tiempo. Por supuesto, esta no es la forma en que se esperaría que la población de dos especies (o incluso una especie) se comportase.

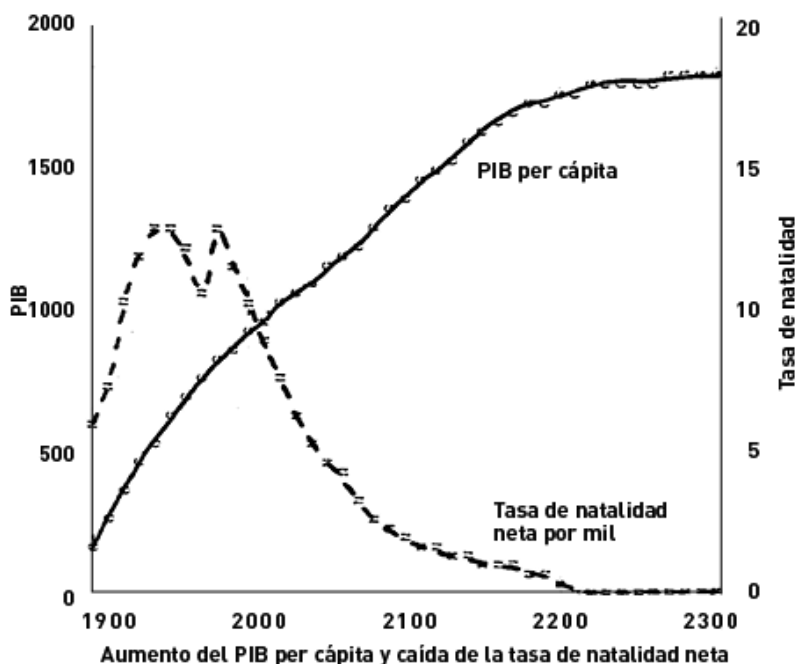
Pero el modelo Lotka-Volterra no era “incorrecto”, simplemente no podía utilizarse de esta forma. Ambas ecuaciones del modelo necesitan ser resueltas conjuntamente para hacerlo funcionar de manera que describa la interacción entre los depredadores y las presas (aunque aproximadamente). De este mismo modo, en el modelo World3, todas las ecuaciones necesitan resolverse de forma conjunta para que el modelo funcione como se supone que ha de hacerlo. El error obvio de Nordhaus fue indicado y descrito por el propio Forrester (Forrester et al., 1974):

El caso realizado por Nordhaus en contra del sector de la población de World Dynamics descansa en el uso de los datos reales que él intenta relacionar con las hipótesis del modelo. No obstante, Nordhaus compara incorrectamente una sola relación dimensional en la dinámica de sistemas (entre la tasa de natalidad neta y el estándar de vida material) con los datos de las series temporales. No puede dar cuenta de la presencia de otras variables que influyen en las series temporales. Como resultado, erróneamente afirma que el modelo es inconsistente con los datos. De hecho, los datos que Nordhaus presenta apoyan la validez de las hipótesis del modelo de World Dynamics.

Posteriormente, Forrester desarrolla su modelo completo y realiza el gráfico siguiente (gráfico 2):

Gráfico 2

La respuesta de Jay Forrester (1974) a la crítica de Nordhaus (1973). Esta figura muestra que el modelo mundial utilizado por Forrester en su estudio de 1971, *World Dynamics*, puede describir datos reales



Fuente: permiso facilitado por Springer.

En el gráfico 2 se ve que el comportamiento de la tasa de natalidad en función del PIB producido por el modelo de Forrester es cualitativamente consistente con los datos históricos. Más tarde, Myrtveit (2005) reexamina la cuestión y llega a la misma conclusión. Parece claro, a partir de esta discusión, que Nordhaus, en su crítica al libro de Forrester, había omitido algunos puntos básicos de los modelos y de los propósitos del modelado del mundo mediante la dinámica de sistemas. Desafortunadamente, sin embargo, el artículo de Nordhaus de 1973 dejó una gran impronta en el subsiguiente

debate, debido en parte a la reputación de Nordhaus y en parte al hecho de que la respuesta de Forrester (Forrester et al., 1974) no fue ampliamente conocida, y a que fue publicada en un diario escasamente conocido (Policy Sciences), que ni siquiera estaba dedicado a la economía.

Sobre este tema, es sorprendente que los editores del Economic Journal, que publicaron el artículo de Nordhaus, no pidieran a Forrester una respuesta siendo una práctica común e incluso cortesía en casos como este. No se cuenta con registros que nos indiquen que Forrester pidiera al Economic Journal publicar su refutación, pero era obviamente la primera elección para él si quería contestar a Nordhaus, como hizo. Consecuentemente, parece probable que los editores del Economic Journal rechazaran publicar la respuesta de Forrester y que, por ello, se viera forzado a publicarla en otro diario. Este es otro indicador de que el debate acerca del modelado del mundo fue especialmente severo y que no siguió las reglas aceptadas para este tipo de intercambios.

El debate científico sobre LDC se desencadenó a principios de la década de los setenta y gradualmente se fue apagando a medida que pasaban los años. En 1978, Francis Sandback publicó un artículo titulado “The rise and the fall of the Limits to Growth debate” (Sandback, 1978) en el que indicaba que, en aquel momento, se encontraba ya decayendo. La mayoría de los economistas siguieron a Nordhaus y decidieron que la dinámica de sistemas era incompatible con los modelos económicos del momento, que el modelo de LDC había fallado y que no merecía mayor discusión.

El debate sobre el modelado del mundo mediante la dinámica de sistemas volvió a encenderse, de forma breve, en 1992, cuando tres de los autores del primer libro de LDC (los dos Meadows y Jorgen Randers) publicaron una secuela con el título Beyond the Limits (Meadows et al., 1992). En este segundo libro, los autores actualizaban los cálculos del primer estudio de LDC obteniendo resultados similares. La publicación de Beyond the Limits supuso una nueva respuesta por parte de William Nordhaus, en esta ocasión bajo el título de Lethal

Models (Nordhaus, 1992a). Este nuevo artículo retomó algunos de los argumentos anteriores propuestos por Nordhaus en su artículo de 1973, pero con considerables diferencias.

Al abordar las 43 páginas del artículo de Nordhaus de 1992, inmediatamente se aprecia que no contiene esta vez ataques ad personam, a diferencia de lo que ocurrió en el primer artículo (Nordhaus, 1973). Al contrario, Nordhaus, explícitamente agradece a los autores de LDC sus comentarios y su ayuda. Asimismo, se observa que el artículo no contiene más acusaciones de “mediciones sin datos”, que constituyó el tema principal del artículo de 1973. Todo lo que Nordhaus tiene que decir a este respecto es (p. 14):

En Límites I no se hizo ningún intento por estimar las ecuaciones de comportamiento econométricamente, aunque parece que se ha realizado algún intento por calibrar algunas de las ecuaciones, como la ecuación de población, en función de los datos disponibles.

Parece que este no es el único punto de vista en el que Nordhaus da marcha atrás. En la página 15, por ejemplo, se puede leer que:

El comportamiento dinámico de los enormemente complicados LDC no fue totalmente comprendido (o incluso comprensible) por nadie, ni autores ni críticos.

Uno se pregunta si Nordhaus se incluía a sí mismo entre estos “críticos”. El artículo de Nordhaus de 1992 está dedicado a demostrar que al modelo World3 le falta un parámetro importante que él identifica como “progreso tecnológico” y que, debido a ello, todo el estudio de LDC es imperfecto.

Para su demostración, Nordhaus pretende mostrar que el modelo World3 puede remodelarse en una formulación más simple y “equivalente”. El modelo que Nordhaus propone para este propósito es casi idéntico a uno descrito por Joseph Stiglitz (1974a, b), a pesar de que no cita el trabajo de Stiglitz. A su vez, el modelo de Stiglitz derivaba de uno desarrollado originalmente por Robert Solow en un artículo famoso publicado en 1957. El modelo se conoce hoy como Solow-Stiglitz y se basa en un concepto bien conocido por los economistas, el de la “función de producción”.

La idea de la “función de producción” es que es posible describir un sistema económico en términos de una función analítica que incluya parámetros como capital, trabajo, tierra y otros. Para sus propósitos, Nordhaus utiliza una forma representada como (Nordhaus, 1992a):

$$Y = HLWR^TKD$$

Aquí Y es el producto económico del sistema, L es el trabajo, K es el capital, T representa a la “tierra”, R para “recursos minerales” y H para “capital humano” o “tecnología”. Este término H se conoce como “productividad total de los factores” (TFP) o “residual de Solow”, ya que fue introducido por Solow en su artículo de 1957. Los exponentes escritos en letras griegas son parámetros regulables que se utilizan para ajustar el modelo a los datos históricos.

A partir de esta formulación, Nordhaus procede a evaluar los valores de los parámetros así como los valores numéricos de los exponentes para todo el sistema económico mundial. Para los “recursos minerales”, parámetro R, Nordhaus utiliza una fórmula exponencial de decaimiento como $R = e^{-\mu t}$ (a pesar de que la producción de casi todos los recursos minerales se ha visto incrementada hasta ahora).

Llegados a este punto, Nordhaus manifiesta que el modelo

contiene al menos cuatro “condiciones letales”, es decir, que conducen a una caída de la producción debido a: i) el agotamiento de los recursos, ii) la insuficiencia de tierras, iii) el crecimiento de la población y iv) la contaminación (aunque la contaminación no se tiene en cuenta explícitamente en el modelo). De hecho, es bien sabido que este modelo no puede describir el crecimiento histórico de la economía mundial, si no fuera por el factor H (tecnología) que viene a su rescate. Como este factor crece con el tiempo, el modelo puede mantener la producción creciendo, incluso en presencia de la disminución de los recursos minerales y de otros límites. Al final, Nordhaus afirma que (p. 16):

El cambio tecnológico debe exceder un cuarto del 1 por ciento al año para superar la resistencia al avance del crecimiento en este caso simple. Los casos históricos de productividad total de los factores, h , en países desarrollados, han sido del orden de 0,01 a 0,02 que está muy por encima de la tasa requerida para compensar el agotamiento de los recursos y los rendimientos decrecientes.

Pero ¿cómo se relaciona todo esto con el modelo de LDC? La idea de Nordhaus es que su modelo es “equivalente” al de LDC porque ambos modelos son “letales”, en el sentido de que ambos predicen una caída terminal. Esto es así, salvo que sean retocados de tal manera que incluyan un factor tecnológico que mantenga las curvas de producción creciendo con el tiempo. Debido a que el modelo de LDC no contiene un TFP, de acuerdo con Nordhaus, no puede describir el futuro del mundo real.

Desafortunadamente, se plantea aquí un problema: los dos modelos no son equivalentes en el sentido en que Nordhaus indica. Es cierto que el modelo Solow-Stiglitz no puede describir el crecimiento de la economía sin asumir la existencia de un “factor tecnológico”(o “residual de Solow”). Pero el modelo de LDC no necesita algo como esto. Puede describir el

crecimiento de la economía sin necesidad de un factor ad hoc, que no pueda ser medido y que podría identificarse como “progreso tecnológico”. De esta forma, el apunte que hace Nordhaus es una mala interpretación de la dinámica de sistemas utilizada en LDC.

Lo que Nordhaus estaba haciendo realmente con su artículo de 1992 era presentar una versión del modelo estándar neoclásico de la economía y contrastarlo con el modelo de LDC. Como es obvio, los dos modelos tienen puntos en común y otros que los diferencian: ambos modelos pueden describir el crecimiento casi exponencial de la economía desde principios del siglo XX hasta la actualidad. Donde divergen los modelos es, aproximadamente, en las primeras décadas del siglo XXI. El modelo Solow-Stiglitz indica que la economía se mantendrá creciendo indefinidamente; el modelo de LDC, en cambio, afirma que en algún momento se alcanzará un máximo para después comenzar a descender.

Evidentemente, algunos modelos son mejores que otros, pero un modelo puede demostrarse que es “incorrecto” únicamente mediante el descubrimiento de inconsistencias en su estructura interna, o bien mediante el simple hecho de que no describa la realidad. Esto es lo que Nordhaus fallidamente intentó en su artículo de 1973 con relación a LDC. En 1992, expuso un enfoque diferente pero, nuevamente, no consiguió probar que el modelo utilizado en el estudio de LDC no podía describir la realidad histórica.

A pesar de ello, el artículo de Nordhaus de 1992 es un estudio valioso que examina puntos válidos sobre el modelado del comportamiento de la economía mundial. Podría haber conducido a un debate y, quizá, a una definición de las competencias que pertenecerían, respectivamente, a economistas y a científicos de sistemas, pero esto no ocurrió. Ya era demasiado tarde, en 1992 no había ningún interés entre los economistas por discutir el enfoque de la dinámica de sistemas que ya habían decidido que, como mucho, era irrelevante. De hecho, el diario que publicó el artículo de Nordhaus, como ya se ha comentado, no pidió a los autores del

LDC que publicaran una refutación. En su lugar dio un espacio al final para una sección de “discusión” que fue tremendamente crítica con LDC y a la que no invitaron a los autores de este a participar. Nuevamente se observa que el debate fue duro y que no se respetaron las reglas aceptadas en la ciencia.

Este artículo de Nordhaus sentenció la definitiva separación de dos mundos: el de los economistas y el de los científicos de sistemas. Tras 1992, el debate, en un sentido científico del término, se redujo a simplemente unos artículos que trataban sobre la cuestión del modelado del mundo mediante la dinámica de sistemas, escritos por economistas de la corriente dominante (por ejemplo, Mikesell, 1995).

Revisando el debate sobre LDC de 1972 que tuvo lugar hasta el último estallido de 1992, la impresión general es que fue incompleto, esto es, nunca se abordaron realmente las preguntas que se plantearon al principio. En la mayor parte de los casos, la crítica se basó en una lectura del estudio precipitada y parcial, mientras que algunas de las mejores refutaciones a LDC, en particular, las de William Nordhaus (1973, 1992a), se habían basado en una comprensión incompleta de lo que la dinámica de sistemas es y de lo que pretende hacer. Solo el estudio del grupo de SPRU (Cole et al., 1973) intentó realizar un examen profundo del modelo sobre la base del estudio de LDC, pero se mantuvo como un caso aislado. En su conjunto, el debate se había extinguido, no porque se hubiera alcanzado una conclusión, sino porque no había generado significativos resultados científicos y, finalmente, ambas partes habían perdido interés en él.

No obstante, hoy se aprecian signos evidentes de que el debate se ha reabierto y de que está apareciendo un nuevo interés en el estudio de LDC. Es un fenómeno que comenzó con el artículo de Matthew Simmon, “Revisiting The Limits to Growth: Could the Club of Rome have been right?”, publicado en el año 2000, que evaluó favorablemente el estudio. En los muchos artículos que están siendo publicados sobre el tema, se aprecia cómo se reavivan los mismos argumentos y el debate centrado en dos

cuestiones fundamentales, ¿los recursos minerales son finitos? Y ¿cómo puede la tecnología superar la finitud de los recursos? Cada una de estas preguntas merecerá un capítulo en este libro.

Notas

1. Los físicos, pueden no estar de acuerdo en este punto. Quizá, la afirmación de Sterman debería ser modificada indicando “todos los modelos no lineales son incorrectos”.

CAPÍTULO 8

LOS RECURSOS MINERALES COMO LÍMITES DEL CRECIMIENTO

El temor a quedarse sin recursos minerales, por ejemplo de petróleo, aparece periódicamente en los debates económicos. Se trata de temores relativamente modernos, pues en la antigüedad no se conocía el concepto de “agotamiento de recursos minerales”. Pero hoy en día, el hecho de que la existencia de ciertos minerales sea limitada es, o debería ser, evidente. Así, si asumimos que los recursos son limitados y que algún día no dispondremos de ellos, ¿cómo podrá sobrevivir nuestra civilización?

La cuestión de la limitación de los recursos minerales fue un tema fundamental en el debate sobre el estudio de LDC de 1972, cuestión que sufrió numerables críticas. Por ejemplo, se acusó de que los datos eran demasiado pesimistas (véase, por ejemplo, Cole et al., 1973; Nordhaus, 1992a). En cualquier caso, también es cierto que el informe incluyó estimaciones más optimistas que las actuales. Sea como fuere, incluso con tales supuestos, el colapso económico es una característica robusta de las simulaciones.

Pero las críticas iban más allá de simplemente declarar que los recursos eran más abundantes de lo que se asumió. Tenían que ver con la propia definición de “recurso”. Un recurso es, obviamente, algo que podemos utilizar: así, ¿qué convierte un trozo de la corteza terrestre en un recurso natural? Esto depende, por supuesto, de lo que debemos hacer, de lo que podemos hacer y de las tecnologías con las que contamos para hacerlo. Por lo tanto, se puede argumentar que cualquier modelo, que parte de la suposición de que los recursos minerales son fijos y limitados, es incorrecto. Esta observación se puede aplicar de manera concreta al modelo World3 utilizado en LDC, crítica que fue argumentada a menudo, tanto en los primeros debates del informe (por ejemplo, Cole et al., 1973; Simon, 1981; Nordhaus, 1992), como en los más actuales (por ejemplo, O'Neill, 2010 y Radetzki, 2010). Se trata de una

cuestión crucial para valorar la validez del modelo de LDC, por lo que el presente capítulo se dedicará a analizarla en detalle.

El debate acerca de la finitud de los recursos minerales se remonta al siglo XVI. En ese momento Georgius Agricola (Georg Pawer, 1494-1555) publicó su *De Re Metallica*, un estudio clásico de la geología. Con aquel estudio, la teoría de que los minerales se regeneraban a medida que se iban extrayendo se fue abandonando gradualmente, aunque resurge de vez en cuando. Por ejemplo, con la reciente teoría del petróleo abiótico (Kenney, 1996, Kenney et al., 2001). En cualquier caso, esta teoría ha sido rechazada por la mayoría de los geólogos (Hook et al., 2010).

Entre los recursos minerales, los combustibles fósiles son un bien fundamental para la sociedad moderna y son cruciales para la obtención de casi todos los demás recursos. El debate sobre el suministro futuro de combustibles fósiles, en particular sobre el petróleo, es quizá el más visible e importante de la actualidad. El temor a “quedarse sin petróleo” se pone de moda o se ridiculiza periódicamente, dependiendo de las variaciones en el precio del crudo. En cualquier caso, este debate se remonta, por lo menos, un par de siglos.

Probablemente, la primera referencia acerca del carácter finito de los combustibles fósiles se pueda encontrar en el libro *Natural History of the Mineral Kingdom*, de John Williams, publicado en 1789, que contenía un capítulo titulado “La cantidad limitada de carbón en Gran Bretaña”. En 1856 William Stanley Jevons revisó este asunto en *The Coal Question*, en 1856.

El estudio de Jevons sigue siendo una lectura muy actual, pues analiza los miedos modernos al agotamiento del petróleo. Para Jevons, estaba claro que las reservas de carbón británicas eran limitadas pero también enfocó el tema desde uno de los principios básicos de la teoría económica: el de la ley de los rendimientos decrecientes. Los costes de extracción del carbón varían en función de algunos factores, tales como la calidad del carbón, su profundidad y el grosor de la veta. Jevons notó que el mejor carbón y el más fácil de extraer era el extraído

primero, lo que deriva en que la extracción se hace cada vez más costosa. Jevons concluyó que el agotamiento convertiría el carbón en algo demasiado caro para la industria británica, por lo que la producción disminuiría.

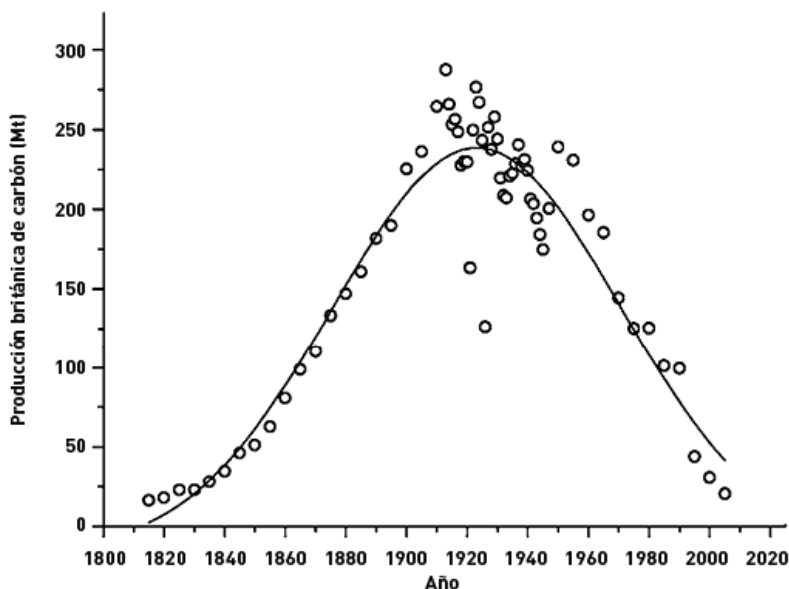
Jevons no calculó el momento exacto en que comenzaría el declive de la industria británica del carbón, pero el marco temporal de su análisis fue de alrededor de un siglo. En el capítulo XII de su estudio manifestó lo siguiente:

Saco la misma conclusión que cualquiera sacaría: que no se puede mantener la tasa actual de aumento de consumo; que nunca podremos alcanzar las altas tasas de consumo que se suponían. Pero esto solo significa que la revisión de nuestro progreso se hará perceptible dentro del próximo siglo.

De hecho, la producción británica de carbón alcanzó su máximo y comenzó a disminuir antes de que pasara un siglo desde el estudio de Jevons (Bardi, 2007a). Hoy en día Gran Bretaña produce menos de una décima parte de lo que producía en el pico (gráfico 1).

Aunque *The Coal Question* fue un estudio muy avanzado para su tiempo, sufrió el mismo destino que LDC un siglo después. Debido al prestigio de Jevons como economista, su teoría sobre el agotamiento del carbón no fue rechazada, pero sí ignorada, al contrario de lo que sucedió con sus contribuciones a la teoría marginal y a la economía neoclásica. Quizá fue debido a que la teoría de Jevons tiene un espacio temporal de 100 años y la gente no suele prever un horizonte tan amplio. O puede que la predicción de que el carbón se agotaría un día u otro colocó a Jevons en el papel de otra Casandra, siendo ignorado, si no ridiculizado.

Producción británica de carbón desde 1815 a 2004 (Bardi, 2007a). los datos de la producción se ajustan a la función de Gauss que se aproxima a la curva de Hubbert. el máximo histórico de producción fue en 1913 con 287 Mt, el máximo ajuste de la curva se da en 1923.



Fuente: imagen cortesía de ASPO (Association for the Study of Peak Oil).

Curiosamente, el propio Jevons sería hoy uno de los mayores críticos a cómo las teorías económicas neoclásicas han ignorado el asunto de los recursos, máxime cuando estos han sido la base de su trabajo e incluso de sus ideas sobre la utilidad marginal. Jevons da nombre también a la “paradoja de Jevons”, que dice que la mejora de la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos naturales no renovables no necesariamente conlleva una mayor duración de los recursos.

Jevons consideraba que un aumento en la eficiencia provocaba una bajada de los precios y, por consiguiente, un aumento del consumo. De hecho, la “paradoja de Jevons” no es una paradoja, pero sintetiza muy bien uno de los aspectos tratados en los cálculos de LDC: una mayor cantidad de recursos naturales (o una mejora en la eficiencia de su explotación) no lleva más que a un colapso del sistema económico.

En cualquier caso, después de Jevons, el problema del agotamiento de los minerales estuvo abandonado durante décadas, hasta que se retomó tras la Primera Guerra Mundial. La guerra dejó claro que el suministro de minerales era un problema estratégico crucial. El pico de la producción británica de carbón, alrededor de 1920 (Bardi, 2007a), puede considerarse el inicio del declive del Imperio británico y quizá uno de los mayores factores para el mismo. Este pico fue advertido, pero nunca realmente comprendido. Por ejemplo, M. W. Kirby en *The British Coal mining Industry, 1870-1946*, de 1977, mencionaba la disminución de la producción pero sin utilizar el término “agotamiento”. En este libro solo se menciona a Jevons una vez y en otro asunto que no tiene que ver con *The Coal Question* de 1856.

El carbón no era el único mineral que mostraba síntomas de agotamiento en 1920. En ese momento también se hablaba de la capacidad de la industria nacional estadounidense para producir suficiente petróleo para la economía. Aunque estas inquietudes estaban fuera de lugar en aquel momento, el problema no podía ser ignorado.

Probablemente estos temores llevaron a los economistas a reexaminar la cuestión del agotamiento de los recursos naturales tras la Primera Guerra Mundial. Una de las mejores “consecuencias” de este renovado interés fue el trabajo de Harold Hotelling (1895-1973). Su modelo, conocido como la “regla de Hotelling” (Hotelling, 1931) tuvo un fuerte impacto en el pensamiento económico.

La regla de Hotelling parte de premisas muy simples. En lo que a recursos se refiere, estas premisas son: a) existen cantidades limitadas y b) tienen unos costes de extracción cero. Otras

premisas más elaboradas son: c) la compañía que lleva a cabo la extracción tiene un monopolio absoluto sobre el recurso, d) tiene un conocimiento absoluto sobre la cantidad disponible en cada momento y e) quiere maximizar sus ingresos por extracción, lo que denomina como “renta”.

Según Hotelling, la vida útil de la explotación de un recurso se determina por la disponibilidad de un recurso “alternativo”, supuestamente más caro, que entra en el mercado cuando el precio del mineral extraído es tan elevado que hace que esta segunda opción sea competitiva. Llegado este momento, la extracción del primer recurso se suspende.

A partir de estas premisas, Hotelling demostró que una compañía podía obtener ingresos constantes durante un tiempo, siempre que el precio del recurso aumentara con la tasa de descuento actual (que se supone constante) y si la producción disminuyese exponencialmente.

El modelo de Hotelling se basa en conceptos muy intuitivos. Se entenderán si los pensamos como si describiesen unas latas de cerveza dentro de un frigorífico. Es cierto que siempre se preferirá una cerveza en el momento actual que más tarde pero, si no existe la posibilidad de reponer las latas consumidas, se tenderá a reducir el consumo. En otras palabras, la cerveza será más valiosa, y por lo tanto más cara, al ser más escasa.

Este es el principal resultado de la regla de Hotelling que, además, tiene cierta lógica intuitiva: es de esperar que, en efecto, el precio de un recurso aumente a medida que su disponibilidad es menor. Como consecuencia, se asume que el precio debe ser un buen indicador de la disponibilidad del recurso. Sin embargo, estas asunciones se suelen extrapolar a conclusiones que el modelo no corrobora.

Revisando casos históricos se constata que los precios de los productos minerales no han mostrado el crecimiento gradual predicho por Hotelling. Por el contrario, sí se ha visto una tendencia de estabilidad o disminución (Barnett y Morse, 1963; Slade, 1982). Así, algunos llegaron a la conclusión de que el re-

curso había sido explotado solo en una fracción mínima de la cantidad disponible (por ejemplo, N'Ordhaus, 1992a; Houthaker, 2002). Otros concluyeron que los recursos no eran limitados en absoluto. Un ejemplo de este enfoque es el libro de Julian Simon, *The ultimate resource*, donde concluye que los recursos minerales del mundo son infinitos en función de cinco tendencias de precios.

Sin embargo, si los datos históricos sobre la evolución de los precios rara vez coinciden con las predicciones del modelo de Hotelling, resulta más razonable suponer que el modelo no es válido, en lugar de realizar conclusiones sobre la gran abundancia del recurso. De hecho, no solo las tendencias históricas de precios no han coincidido normalmente con el modelo de Hotelling, sino que las tendencias de producción tampoco han seguido el descenso gradual que el modelo predice. Por el contrario, prácticamente todos los productos minerales han mostrado una tendencia de crecimiento sólido hasta los últimos tiempos.

En la práctica, es muy posible que los precios estables o decrecientes de productos minerales no reflejen en absoluto una gran abundancia de los recursos disponibles, sino simplemente el horizonte a corto plazo que se marcan las empresas dedicadas a su extracción. Para los directivos de estas empresas, preocupados por el informe del próximo trimestre, los recursos pueden resultar “infinitos” si no hay evidencia de su agotamiento en los próximos años. Como consecuencia, no tiene sentido para ellos optimizar los rendimientos económicos teniendo en cuenta que, en algún momento en un futuro remoto, un hipotético recurso alternativo, podrá suplirlo. Además, las empresas no tienen el monopolio de la extracción. En un mercado libre, las empresas no pueden subir los precios unilateralmente mediante la retención del producto, ya que ello permitiría que otras empresas pudieran aumentar su cuota de mercado.

Por lo tanto, la regla de Hotelling es solo aplicable en el mundo abstracto descrito en sus hipótesis. En el mundo real, la constancia o disminución del precio de un recurso no

necesariamente indica una abundancia del mismo (Reynolds, 1999). La regla puede darse solo cuando el periodo de agotamiento del recurso se dé dentro del horizonte temporal marcado por los directivos de las empresas extractoras. Solo entonces los precios comenzarán a aumentar, porque los directivos verán amenazada la producción. Esto puede ser lo que está sucediendo en la actual fase histórica de aumento de los precios de todos los productos minerales. Si la situación actual es el resultado de que el agotamiento de los recursos afecte a los presupuestos de las empresas extractoras, entonces solo se puede concluir que una incorrecta interpretación de la regla de Hotelling ha llevado a la creencia de que los recursos minerales son más abundantes de lo que realmente son.

Pero, si el modelo de Hotelling puede ser visto como excesivamente optimista, otros modelos lo son aún más. Por ejemplo, existe el llamado “modelo funcional”, también denominado modelo “piramidal de recursos”, probablemente descrito por primera vez por Erich Zimmermann en su libro titulado *World Resources and Industry* (1933). Las principales características del modelo han sido presentadas en tiempos más recientes, por ejemplo, por Julian Simon (1981) y William Nordhaus (1992a).

El modelo funcional tiene en cuenta algo que Hotelling no consideró: que los recursos minerales no son nada similares a las latas de cerveza en un frigorífico. Los recursos minerales tienen una “jerarquía”, en el sentido de que algunos son más caros que otros. El costo de un recurso depende de factores geológicos tales como la profundidad, su concentración, pureza, etc.

Las partes de la corteza terrestre donde un mineral se encuentra más concentrado se denominan “yacimientos”. Solo algunos yacimientos tienen una concentración suficiente para que resulte rentable extraer el mineral de ellos, son las llamadas “menas”. La industria del petróleo utiliza el término “pozo” o “bolsa” para los depósitos de crudo o gas explotables, mientras que la industria del carbón utiliza “filón” o “banco”. En cualquier caso, en ambas industrias se utilizan los términos

“reserva” y “recursos” para depósitos económicamente explotables. Normalmente se usa “reservas” para hablar de la concentración de minerales cuya existencia se conoce y que son económicamente explotables en un tiempo estimado; mientras que “recursos” se usa como genérico, pero también para indicar la concentración de minerales susceptibles de explotación en un futuro o cuya existencia se supone pero todavía no se ha localizado.

Los recursos minerales susceptibles de explotación se presentan en diferentes formas. Las menas presentan diferentes grados de concentración del mineral útil, variación que se conoce como “ley”. Obviamente, cuanto mayor ley, más rentable resulta una explotación. Por otro lado, ni los pozos o bolsas de gas y petróleo, ni las vetas de carbón se clasifican por grados de concentración. Sin embargo, sí lo hacen en función de otros parámetros, como la profundidad de la extracción, la ubicación geográfica, la calidad del recurso y el tamaño del depósito.

El modelo funcional considera estos factores. Tiene en cuenta que la extracción debe comenzar en los recursos más rentables: en las menas de mayor ley. Y cuando estas se agotan, la extracción continúa en menas de ley inferior. Para obtener la misma cantidad de mineral de una mena de menor ley, será necesario extraer más cantidad de material. Tal y como ya indicó Jevons en *The Coal Question* (Jevons, 1866), es el fenómeno físico lo que, a la larga, provoca una subida de precios, y no la idea abstracta que presenta la regla de Hotelling.

Es precisamente en este punto donde Jevons y el modelo funcional divergen. Mientras que Jevons defiende que el aumento de los costes de extracción provocaría una reducción en la producción, el modelo funcional supone que, en un mercado libre, unos precios altos pueden estimular la extracción de recursos de ley inferior. Como consecuencia, la producción podría seguir aumentando.

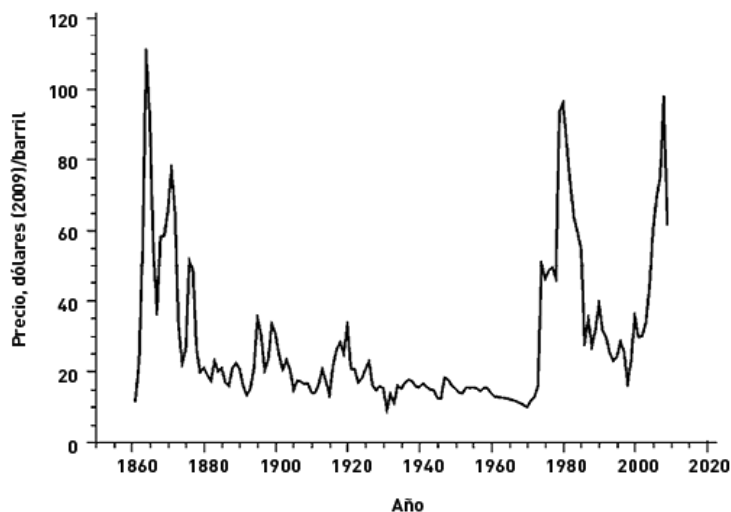
Siguiendo esta línea de razonamiento, el modelo funcional enfatiza el hecho de que no existe la idea de “quedarse sin”

algo. Esta conclusión deriva de “la ley de Lasky” (Lasky, 1950), que dice que la cantidad absoluta de los minerales en la corteza terrestre aumenta con la disminución de la ley. Es decir, la cantidad total de minerales crece geométricamente cuando la ley disminuye aritméticamente.

Pongamos el cobre como ejemplo. Se estima que la cantidad de cobre en la corteza superior terrestre es de aproximadamente 25 partes por millón (ppm) (Wikipedia, 2010). Si tomamos una superficie de 150 millones de kilómetros cuadrados y una densidad media de roca de 2,6 gramos por centímetro cúbico (g/cc), se calcula que hay 10 trillones de toneladas de cobre disponibles por cada kilómetro de profundidad. En comparación, la USGS (US Geological Survey) estima que la disponibilidad global de cobre en la superficie no supera los 3 billones de toneladas. Por tanto, el modelo funcional propone la idea, nada intuitiva, de que los recursos serán más abundantes a medida que son extraídos. Es decir, podemos estar “consiguiendo”¹ recursos, en lugar de “quedándonos sin” ellos.

Este concepto da al modelo funcional el nombre alternativo de “pirámide de recursos”, por la representación gráfica del concepto de que se baja de pequeñas cantidades de minerales de ley mayor (la punta de la pirámide) hacia mayores cantidades de recursos de ley más baja (las capas inferiores de la pirámide). También se conoce como “la creación de recursos”. Se trata de un término muy utilizado en la industria extractiva pero, por supuesto, no debe ser entendido de manera literal en el sentido de que los recursos minerales son creados de la nada. Se refiere a que las nuevas condiciones del mercado, junto con las nuevas tecnologías, permiten que aquellos yacimientos que no eran susceptibles de explotación desde el punto de vista económico, sí lo sean. Esta hipótesis hace que el modelo funcional sea más optimista que el de Hotelling, que, en cambio, asumió un aumento de precios gradual y una disminución de la producción.

Precios históricos del petróleo (corregida la inflación)



Fuente: www.bp.com

El modelo funcional acierta al tener en cuenta el efecto de los precios en la extracción mineral. Los precios provocan que el capital se mueva de un sector a otro de la economía, lo que puede compensar el efecto de agotamiento. Con más equipos, trabajadores y energía, resulta posible mantener la extracción de minerales de menas con cada vez menor graduación. En este sentido, el modelo funcional puede ser visto como un modelo dinámico cualitativo que considera solo un elemento de la economía: la transferencia de capital hacia el sector minero desde el resto de la economía. Queda implícito que la transferencia tendrá lugar durante un momento económico sólido y de crecimiento constante, de manera que el aumento de las necesidades de capital del sector extractivo se puedan acomodar sin dañar la economía en su conjunto.

Sin embargo, el modelo funcional deja sin abordar una cuestión básica: ¿qué pasaría si la necesidad de capital del sector extractivo aumentara más rápidamente que la economía? En ese caso, la transferencia sería, cuanto menos, bastante dolorosa. Para evitar este dolor, la única esperanza está en la tecnología, de la que se espera que pueda mantener bajo control los costes de extracción y bajar los precios. Desgraciadamente, la tecnología conlleva costes energéticos y económicos, y su capacidad de obrar es limitada; por supuesto, no puede extraer minerales allí donde no los hay. La tecnología está sujeta a rendimientos decrecientes, hecho que se demuestra porque los precios de la mayoría de los productos minerales han mostrado una tendencia creciente durante las últimas décadas. Los precios del petróleo, por ejemplo, muestran este comportamiento (gráfico 2).

La curva de los precios del petróleo tiene forma de “U”, comportamiento que se puede observar también en variedad de minerales (Slade, 1982). Esta forma se puede interpretar como el resultado de la competencia entre el agotamiento por un lado, y la tecnología y la economía de escala por el otro. Al comienzo del ciclo de extracción, los avances en la tecnología y la economía de escala conducen a una disminución de los precios. Le sigue una fase donde los precios se mantienen prácticamente constantes y tanto la tecnología como la economía de escala mejoran, pero el resultado solo puede compensar los costes más altos del agotamiento gradual. En algún momento, los precios comienzan a subir, ya que ni las mejoras tecnológicas ni las economías de escala pueden compensar la creciente dificultad de procesar recursos cada vez más dispersos.

Con el tiempo, los precios son solo etiquetas pegadas en un objeto. En un barril de petróleo se puede poner una etiqueta que marque 10 dólares, 100 dólares o incluso 1.000 dólares, pero esto no cambia el hecho de que un barril puede producir alrededor de 6 gigajulios (GJ) de energía, que es realmente para lo que lo necesitamos. La etiqueta tampoco cambia el hecho de que se necesita energía para explorar, extraer y procesar ese petróleo contenido en el barril. La extracción de

petróleo proporciona una ganancia monetaria, pero, sobre todo, produce un beneficio energético, un beneficio neto para la economía. En el caso de los minerales que producen energía, a este beneficio se le llama “tasa de retorno energético”, “EROI” o “EROEI” por sus siglas en inglés (Hall et al., 2008). En todo caso, la necesidad de energía para la extracción se aplica a todos los recursos minerales: cuanto más energía se necesite, más cara y menos provechosa será la extracción.

El papel de la energía en la extracción de minerales fue examinado en profundidad, quizá por primera vez, en un trabajo muy conocido de Goeller y Weimberg (1978) titulado *The Age of Substitutability*. Los principales puntos de este estudio se presentan a continuación:

1. Una vez agotado, un recurso mineral puede ser sustituido por un recurso equivalente, suponiendo que exista la energía suficiente para su extracción. Por ejemplo, aluminio por cobre, aceites sintéticos por mercurio, etc. La única excepción es el fósforo, fundamental para la producción agrícola, que no tiene sustituto posible.

2. Con suficiente energía se pueden extraer minerales de menas con menor concentración. En un caso muy extremo incluso se puede buscar minerales por toda la corteza terrestre.

Los autores de *The Age of Substitutability* mostraban un gran optimismo acerca de la futura disponibilidad energética, algo bastante sorprendente, ya que Weimberg dirigió el Laboratorio Nacional Oak Ridge y era un defensor constante de la energía nuclear, que, a su juicio, daría lugar a la disponibilidad de energía barata y abundante en el futuro. Sobre esta base, Goeller y Weimberg describieron lo que ellos denominaron “el principio de sustituibilidad” de la siguiente manera:

Ahora expondremos el principio de sustituibilidad “infinita”: con tres excepciones notables —fósforo, algunos oligoelementos de la agricultura y los combustibles fósiles productores de energía (Chx)— la sociedad puede subsistir con minerales inagotables o casi inagotables, con solo una pérdida relativamente pequeña en calidad de vida.

Este principio “universal” parece no ser tan universal, ya que son los propios autores los que declaran que no todo puede ser sustituido. Pero lo importante es que el principio de sustituibilidad infinita solo puede funcionar si el sistema económico puede producir suficiente energía para hacer que funcione. La pregunta, entonces, es si es realista pensar que podemos producir tanta energía.

La energía es un parámetro físico que no se puede crear de la nada, como sí se puede hacer con el dinero. Así que, ¿cómo afectan la disponibilidad energética y el coste a la disponibilidad de recursos minerales? Este es un asunto que merece ser examinado en detalle.

La corteza terrestre contiene enormes cantidades dispersas de mineral. No resulta inconcebible coger un trozo cualquiera de la corteza, procesarla para separar los elementos que la componen y utilizarlos como materias primas para la economía. Se podría hacer, por ejemplo, usando un espectrómetro de masa, es decir, ionizando los átomos y separándolos en función de su peso atómico. De esta manera, podríamos construir una “máquina de explotación minera universal” (Bardi, 2008c), que podría coger cualquier trozo de la corteza y producir todos los elementos de la tabla periódica, cada uno bien ordenado en su caja².

Sin embargo, las cajas contendrían cantidades muy diferentes de materiales. Se cree que la corteza terrestre contiene 88 elementos en concentraciones que abarcan al menos siete órdenes de magnitud. Algunos elementos se definen como

“comunes”, con concentraciones de más de 0,1 por ciento en peso. De ellos, cinco son tecnológicamente importantes como metales: hierro, aluminio, magnesio, silicio y titanio. El resto de metales existen en concentraciones menores, a veces mucho menores. La mayoría de los metales de importancia tecnológica se definen como “raros” y existen principalmente como trazas en roca común, es decir, dispersos en el nivel atómico en silicatos y otros óxidos. La abundancia de elementos raros (como cobre, zinc, plomo y otros) en la corteza es inferior a 0,01 por ciento (100 ppm). Otros, tales como el oro, el platino o el rodio, existen en la corteza en pocas partes por millón, o incluso menos.

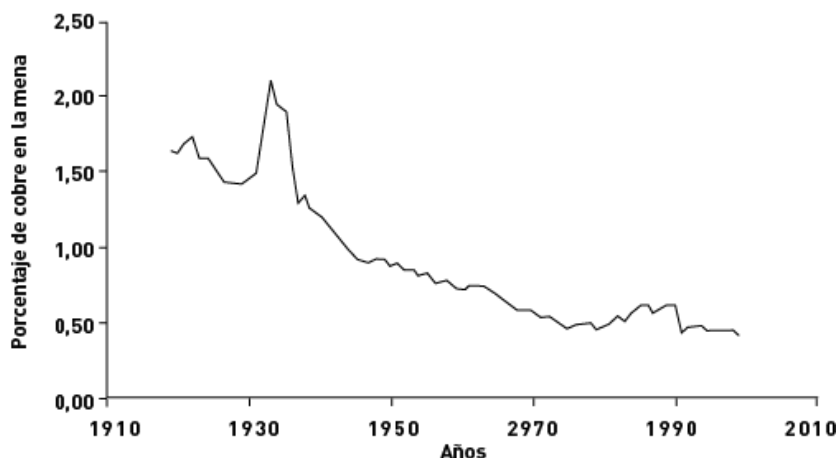
Teniendo en cuenta estas diferencias, una hipotética “máquina de explotación minera universal” tendría que procesar enormes zonas de la corteza terrestre para obtener minerales raros en cantidades similares a las extraídas hoy en las menas. Probablemente los resultados no serían satisfactorios, aunque el principal problema sería otro: los costes de energía.

El coste de la energía para la extracción puede entenderse como inversamente proporcional a la concentración. Es decir, la extracción de minerales de una mena que contiene la mitad de concentración requiere el doble de energía (Skinner, 1979). Véase un ejemplo práctico: hoy en día se extrae el cobre de menas con una concentración de alrededor del 1 por ciento, principalmente calcopirita, CuFeS_2 . Estos valores corresponden a una concentración de cobre de alrededor de 0,5 por ciento en peso. Con el tiempo, la industria minera ha estado explotando progresivamente menas de ley menor, pero, en la práctica, parece que se ha llegado a algún tipo de barrera de concentración, como se muestra en el gráfico 3 (Meadows et al., 2004).

Gráfico 3

Datos históricos de la ley en las menas explotadas en la

producción de cobre



Fuente: Meadows et al. (2004). Imagen cortesía de Dennis Meadows.

Puede ser que el factor limitante que está provocando este comportamiento sea la energía involucrada. Actualmente, la energía utilizada en la producción de cobre de la mena está en el rango de 30-65 megajulios por kilogramo (MJ/kg) (Norgate y Rankin, 2002), con un valor medio de 50 MJ según Ayres (2007). De esta información se desprende que la producción mundial de cobre (15 Mt por año) necesita aproximadamente 0,75 exajulios (EJ). Se trata de alrededor del 0,2 por ciento de la producción anual mundial de energía primaria (400-450 EJ) (Lightfoot, 2007).

La siguiente tabla muestra la energía específica necesaria para la producción de algunos metales comunes, junto con el total de energía requerida para la presente producción mundial (tabla 1).

Tabla 1

Energía específica y total de la producción de algunos metales

Metal	Producción específica (kg/EJ)	Producción (Mg/año)	Energía total (EJ)
Acero	22	1.100	24
Aluminio	211	33	6,9
Cobre	48	15	0,72
Zinc	42	10	0,42
Níquel	160	1,4	0,22
Plomo	26	3	0,08

Fuente: los datos sobre la energía específica son de Norgate y Rankin (2002). Los de producción son de la United States Geological Survey (USGS) en 2005.

Considerados en conjunto, estos datos indican que la energía utilizada por la industria minera puede ser del orden del 10 por ciento de la energía primaria total producida. Esta estimación coincide con los resultados de Rábago et al. (2001), que calculan un rango del 4 al 7 por ciento, y con los de Goeller y Weinberg (1978), del 8,5 por ciento para la industria de los metales solo en EE UU.

Está claro que la minería requiere un uso intensivo de energía. Si se tuviera que hacer frente a una reducción en la disponibilidad de energía, esto se vería inmediatamente reflejado en una menor disponibilidad de minerales. Al mismo tiempo, si se tuviera que explotar menas con menor concentración, ello conllevaría inmediatamente un aumento significativo en la demanda de energía que las infraestructuras mundiales actuales tendrían difícil conseguir.

Por otro lado, está el problema relativo al concepto de “umbral mineralógico”, desarrollado por Brian Skinner (1976, 1979). La distribución de la mayoría de elementos químicos de interés tecnológico en la corteza terrestre puede ser “bimodal”, con un pico muy grande en concentraciones bajas y uno mucho menor en concentraciones altas. Se puede comenzar a extraer en la mena con mayor concentración, pero, según se avance hacia concentraciones menores, se llegará a una “zona muerta”, el umbral mineralógico, donde el mineral existe en concentraciones tan pequeñas que pueden hacer inservible su extracción.

Si se mantiene este razonamiento hasta sus últimas consecuencias, podemos calcular la energía necesaria para hacer funcionar una “máquina de explotación minera universal”. Por ejemplo, se estima que son necesarios aproximadamente 400 GJ/kg de energía para la extracción de

cobre en la corteza terrestre con una concentración de 50 ppm (Bardi, 2008c). Si se quisiera mantener la producción actual de 15 millones de toneladas de cobre al año bajo este modelo, se debería consumir 20 veces la actual producción mundial de energía primaria.

Por lo tanto, si es posible extraer y procesar tanta cantidad de minerales es solo porque se está utilizando la energía gratuita proporcionada gracias a los procesos geoquímicos de la antigüedad que crearon los yacimientos minerales y las menas que son explotadas hoy en día. Las menas de alta concentración mineral tienen una gran cantidad de energía, bien generada por el calor del núcleo terrestre, bien por energía solar en combinación con procesos biológicos (De Wit, 2005). Pero los procesos que crean las menas son lentos y raros. Desde el punto de vista humano, los minerales son un recurso finito.

Existen pocas esperanzas de encontrar fuentes minerales de alta concentración más allá de las que ya se conocen. La corteza terrestre ha sido explorada muy a fondo y el hecho de cavar más profundo probablemente no sirva de nada, ya que los minerales se forman principalmente por procesos hidrotermales que suceden cerca de la superficie. El suelo oceánico es geológicamente demasiado reciente para contener minerales, solo el fondo del mar cerca de los continentes puede ser una buena fuente de minerales (Roma, 2003). Los propios océanos contienen iones metálicos, pero la extracción de metales raros del mar es algo incuestionable, ya que el proceso sería muy costoso desde el punto de vista energético (Bardi, 2010). Además, las cantidades disueltas no son muy grandes. Por ejemplo, teniendo en cuenta la concentración de cobre en los océanos (Sadiq, 1992), podemos calcular que la cantidad total disuelta corresponde a 10 años de la actual producción de la mina. Hay quien sugiere el espacio exterior como fuente mineral, pero el coste energético de dejar la Tierra supone un impedimento importante. Por tanto, la mayoría de los cuerpos del sistema solar, como la Luna y otros asteroides, están geoquímicamente “muertos” o no contienen menas.

La recuperación de minerales a partir de residuos no es una solución, por lo menos actualmente. Normalmente, los residuos industriales y urbanos son acumulados en vertederos o incinerados. En ambos casos, la recuperación es prácticamente imposible (Shen y Fossberg, 2003). En relación con el reciclaje, según la USGS (Papp, 2005), la tasa media de reciclado en EE UU es aproximadamente del 50 por ciento para los principales metales producidos, cantidad insuficiente para compensar la disminución de la concentración mineral en las menas.

Por lo tanto, para resolver el problema del agotamiento mineral, es necesario un cambio radical en el modo en que la producción industrial es concebida y gestionada. Esto requeriría, además, importantes inversiones que probablemente no se materialicen hasta que la escasez de minerales se vuelva un asunto muy grave. Pero, en ese momento, el declive económico impedirá que se reúna el suficiente capital para construir una nueva infraestructura.

Ahora es posible volver a la pregunta original con la que se iniciaba este capítulo y examinar cómo se modelizó el agotamiento de minerales en LDC. Los supuestos básicos del modelo World3 son compatibles con las consideraciones desarrolladas en este capítulo. Tal y como se lee en la edición de LDC de 2004:

A medida que se consumen los recursos, se supone que la calidad de las reservas restantes disminuye [...] Eso significa que serán necesarios más capital y energía para extraer, refinar y transportar una tonelada de cobre o un barril de petróleo. A corto plazo, esta situación puede ser compensada por el avance tecnológico. A largo plazo, se reducirá la capacidad de crecimiento físico.

Si este comportamiento se examina en un modelo dinámico simple que considera solo los recursos y el capital (Bardi y

Lavacchi, 2009), el resultado es que la producción del recurso sigue una curva con “forma de campana” similar a la propuesta por Hubbert (1956) para el caso del petróleo sobre la base de un enfoque empírico. El comportamiento de varios productos minerales también muestra una curva de producción con “forma de campana” (Bardi y Pagani, 2007), lo que indica que estos modelos describen correctamente el proceso de extracción en una economía de mercado.

El modelo World3 de LDC no examina los recursos minerales individuales, sino que los agrupa en un único parámetro como “recursos no renovables”. Se supone que estos recursos existen en cantidades finitas y que la tasa de extracción depende de la disponibilidad de capital de la industria extractiva. La economía puede desviar algo de capital de otros sectores hacia la industria extractiva, pero este capital no es infinito. Este enfoque está claramente en consonancia con las consideraciones desarrolladas aquí y con los principios de la física. Los resultados para este escenario (y para muchos otros escenarios presentados en LDC y basados en principios físicos razonables) son que el parámetro de los recursos naturales disminuye con el tiempo y que la producción muestra un pico.

Llegados a este punto, es posible responder a la pregunta formulada al inicio del capítulo: ¿es correcto asumir que los minerales son recursos limitados? La respuesta es sí, siempre y cuando se tenga en cuenta que no son limitaciones de cantidades, sino de energía. La mayor parte de la energía que usamos proviene de los propios recursos minerales (combustibles fósiles y uranio), cuya cantidad es limitada y puede que ya se haya iniciado su agotamiento. El resto proviene de recursos renovables, cuya limitación de producción está determinada por la energía solar.

Por supuesto, un gran avance tecnológico inesperado en la producción de energía podría cambiar esta situación, pero no se puede esperar que eso suceda pronto, o incluso algún día. Por lo tanto, el agotamiento de los recursos energéticos, combinado con el agotamiento de las menas minerales, asegura que en el futuro se dé una disminución de la

producción mineral, disminución que ya ha podido comenzar para algunos minerales (Bardi y Pagani, 2007). Al final, el hecho de que vivamos en un mundo limitado es la base del escenario presentado en LDC, y las consideraciones desarrolladas en este capítulo refuerzan dicho supuesto.

Notas

1. En el texto original “consiguiendo” aparece como running into. [Nota de autor: la expresión running into oil se asocia al profesor Peter Odell, de la Universidad de Rotterdam.]
2. Una versión extrema de esta idea fue presentada por Willard Hawkins en 1940 en una historia de ciencia ficción titulada “La Esfera menguante”, donde se asumía que la corteza terrestre se podía transformar directamente en comida.

CAPÍTULO 9

EL PROGRESO TECNOLÓGICO Y LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO

En 1971, el presidente estadounidense Richard Nixon firmó “The National Cancer Act”, lo que se conoció como una declaración de guerra al cáncer. En el marco del entusiasmo provocado por el éxito del Programa Apolo, que llevó al ser humano a la Luna en 1969, parecía posible repetir el mismo enfoque en la lucha contra el cáncer, solucionando el problema con la concentración de recursos científicos, tecnológicos y económicos a esta causa.

Cuarenta años después y con un gasto superior a los 100 mil millones de dólares (Kolata, 2009), se han realizado importantes avances en la cura del cáncer (Mukherje, 2010), pero los resultados están lejos de aquellos logrados con el Programa Apolo (Spector, 2011). El cáncer sigue siendo la principal causa de muerte en el mundo occidental.

Esta historia acerca de los esfuerzos realizados en la lucha contra el cáncer demuestra que el progreso tecnológico no siempre es la panacea que cura todos los males y resuelve todos los problemas. Sin embargo, mucho ha cambiado desde los tiempos en que Edward Gibbon escribió *Decline and fall of the Roman Empire* (1788). Probablemente fue el primero en señalar que “las antiguas civilizaciones estaban desprovistas de muchas de las comodidades logradas con el progreso industrial”. Hoy en día, el progreso es una característica normal de la vida; puede que no conlleve una cura milagrosa para el cáncer, pero vemos que está ahí y que afecta constantemente a la forma en que hacemos las cosas. Esperamos que el progreso mejore nuestras vidas.

Una de las críticas más comunes a LDC era que no tenía en cuenta el progreso tecnológico. Pero, como hemos visto en el capítulo anterior, esto no es cierto. Los modelos presentados en LDC desarrollan escenarios que incluyen hipótesis que solo

pueden ser el resultado de los avances tecnológicos, por ejemplo, el uso de cantidades infinitas o muy grandes de los recursos naturales. Pero todavía se puede decir que LDC no tuvo en cuenta los avances tecnológicos de la manera correcta. Y eso lleva a una pregunta básica: ¿qué es, exactamente, el progreso? Aclarar este punto es esencial para el debate sobre la validez del enfoque de LDC y es el tema del presente capítulo.

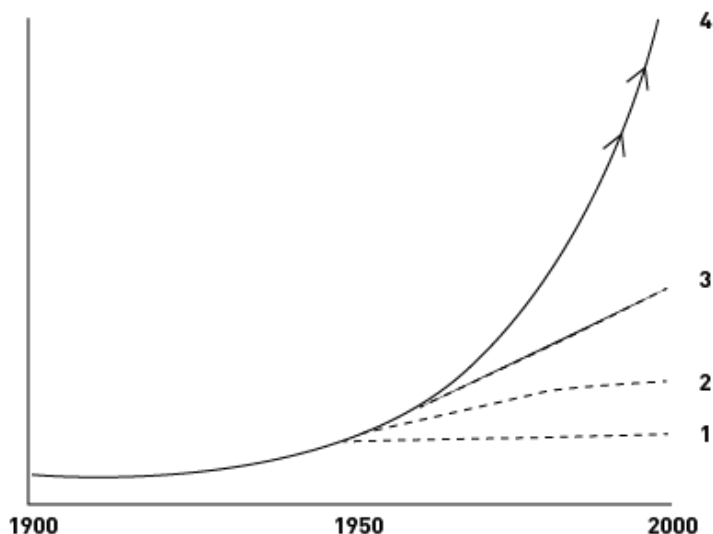
Todo el mundo sabe que el progreso significa ir a mejor. Los aviones van más rápido, las pantallas de televisión son más grandes, los teléfonos móviles más pequeños, y así sucesivamente. Pero, ¿cómo se puede transformar estas observaciones en parámetros que se puedan utilizar en las ecuaciones de un modelo matemático? ¿Qué se debe medir? ¿Velocidad, tamaño, complejidad?

Estas dificultades no han disuadido a las personas de buscar algunos métodos que puedan utilizarse para modelizar el progreso. Robert Anson Heinlein, conocido escritor de ciencia ficción, fue tal vez el primero que intentó esta tarea en 1952 con su artículo titulado “Pandora’s box” (Heinlein, 1952). En este artículo se incluye el siguiente gráfico (gráfico 1).

De los cuatro casos posibles mostrados en el gráfico 1, Heinlein se inclinaba favorablemente por el cuarto caso, el crecimiento exponencial del progreso, a pesar de no poder explicar porqué ni lo que representaba exactamente esta figura, que parece evidente que está hecha a mano en el original.

Gráfico 1

Representación de Robert Heinlein del gráfico en ‘Pandora’s box’, publicada en 1952 en la revista ‘Galaxy Magazine’



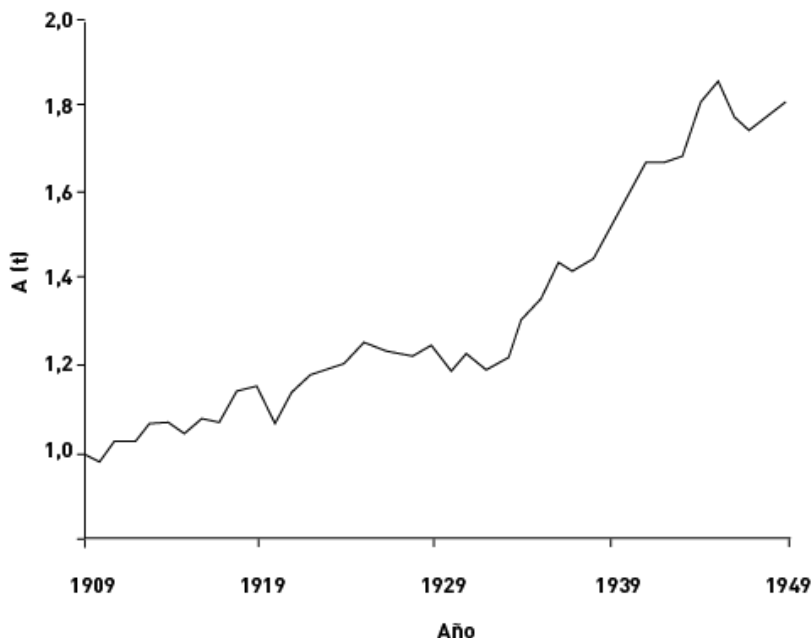
Heinlein acompañó su interpretación del progreso con una serie de predicciones detalladas de cómo el mundo debía ser en el año 2000, es decir, 50 años después. Este tipo de predicciones, denominadas “prospectivas tecnológicas”, son muy difíciles de realizar para largos periodos de tiempo. Así, casi todas las predicciones de Heinlein resultaron erróneas. Heinlein predijo el desarrollo de la antigravedad, los vuelos espaciales comerciales, la extensión de la vida humana más allá de los 100 años, y un montón de maravillas más que jamás se materializaron. Por el contrario, no pudo imaginar cosas tales como Internet, los teléfonos móviles, los ordenadores personales y mucho de lo que hoy es considerado como la manifestación tangible del progreso.

Los errores de Heinlein demuestran lo difícil que es predecir el futuro. En todo caso, su curva del crecimiento exponencial del progreso fue una brillante intuición. Aunque su modelo no se pudo cuantificar, al menos se centró en la pregunta correcta y ofreció una respuesta que resultó muy popular en los años siguientes. Por ejemplo, en el libro de Damien Broderick, *The Spike* (Broderick, 2001) aparece de nuevo el mismo concepto de crecimiento exponencial del progreso y se expone el mismo problema de su cuantificación.

La cuestión del progreso fue examinada de una forma más cuantitativa unos años después del trabajo de Heinlein, cuando el economista Robert Solow publicó los resultados de un estudio que a menudo se considera como la base para la comprensión del progreso tecnológico en la economía (Solow, 1957). Probablemente Solow no conocía la obra de Heinlein y seguramente tenía un enfoque muy diferente. En cualquier caso, Solow llegó a la misma conclusión: el progreso crece exponencialmente con el tiempo.

Gráfico 2

El famoso gráfico de Robert Solow que muestra la función ' $A(t)$ ', conocida también como 'residuo de Solow', quien propone que debe ser identificado como una medida cuantitativa de la mejora productiva generada por el progreso tecnológico



La siguiente ilustración obtenida del estudio original de Solow de 1957, muestra un gráfico con la función $A(t)$. Solow sugirió que debía entenderse como una medida cuantitativa del progreso tecnológico. En el gráfico, la función $A(t)$ se expresa como una fracción del valor para 1909, tomado como una unidad. Además, crece exponencialmente con el tiempo a una velocidad de 1-2 por ciento por año (gráfico 2).

Solow llegó a este concepto al tratar de describir la forma en que el PIB de los EE UU variaba con el tiempo. Estaba usando una “función de producción” llamada Cobb-Douglas, por los nombres de los autores que la propusieron por primera vez en 1938. Ya se ha visto en capítulos anteriores cómo Nordhaus (1922a) utiliza el concepto con el fin de proponer un modelo alternativo al de LDC. Conviene profundizar en esta teoría.

La función de producción puede escribirse en su forma simple como (Ayres, 1998):

$Y = La Kb$,

donde Y representa a la producción, L el trabajo, K el capital, y a y b son exponentes llamados “elasticidades”. Esta forma simplificada ya muestra algunas de las características fundamentales de esta función. Por ejemplo, se entiende normalmente (aunque no siempre) que los factores han de ser “homogéneos”, algo que concordaría con el teorema de Euler. En este caso, el sistema muestra rendimientos de escala constantes, por ejemplo, duplicando ambos factores (L y K) se duplica el resultado. Esta condición se cumple si $a + b = 1$. Debe tenerse en cuenta que la misma producción se puede obtener dando diferentes valores al capital y al trabajo. El conjunto de valores de capital y trabajo que producen el mismo resultado se denomina “isocuanta”.

Tal y como se muestra aquí, la función es muy simple, pero puede modificarse y tener en cuenta más factores, tal y como hizo William Nordhaus (1992a) con el fin de refutar el enfoque de LDC. En cualquier caso, en 1950 Robert Solow utilizó la función en su forma simple para describir el resultado de la economía de EE UU. En 1957 Solow descubrió que la función no era capaz de describir datos históricos, a menos que se multiplique por el factor $A(t)$, que más tarde se conoció como el “residuo de Solow” o la “productividad total de los factores” y, en general, una medida cuantitativa de cómo las mejoras tecnológicas conducen a aumentos en la productividad.

Sobre la base de la idea de Solow, se ha sugerido a menudo (véase, por ejemplo, Nordhaus, 1992a y Marxsen, 2003) que la curva de crecimiento exponencial del progreso continuará creciendo a la misma velocidad en el futuro y, por lo tanto, compensará el agotamiento de recursos, como lo ha hecho en el pasado. De hecho, se dice que el propio Solow dijo que “la economía, de hecho, puede continuar incluso sin recursos naturales” (Solow, 1974), aunque esto debería contemplarse como una posibilidad extrema.

Esta idea del progreso cambia la base de la estructura de los

modelos del mundo de LDC. Si un factor “tecnología” con crecimiento exponencial se añade al modelo, y si este factor es suficientemente grande, entonces es posible obtener escenarios en los que el crecimiento de la producción industrial y agrícola se mantiene para siempre o al menos mientras el parámetro del progreso mantenga la tendencia exponencial. Esta opción se presentó por un lado por Boyd (1972), por Cole y Curnow (Cole et al., 1973) y por los autores del estudio LDC, quienes llamaron “IFI-IFO” al modelo (Meadows et al., 2004). La necesidad de tal factor es también la esencia de la crítica de Nordhaus a LDC (Nordhaus, 1992a).

Los modelos que compensan el agotamiento de recursos con el ingenio humano pueden resultar reconfortantes, pero ¿son fiables? Un problema es que el “residuo de Solow” no es solo un residuo. Es un componente importante de la función de producción, la cual no sería capaz de describir los resultados históricos sin él, ni siquiera cualitativamente (Ayres, 2001, 2006). Y ese no es el único problema: Solow pudo haber sobrestimado considerablemente el papel del progreso. Hall et al. (2001) demostraron que, si se tiene en cuenta el crecimiento de la producción energética, el “residuo” básicamente desaparece. Herman Daly criticó fuertemente (Daly, 1997) el enfoque de Solow. También se puede leer en el capítulo quinto de trabajo de Daly titulado Steady state Economics (Daly, 1977) lo siguiente:

Muchos econométricos no están de acuerdo con la idea de que la tecnología justifique la mitad o más del aumento de la producción observado en los últimos tiempos. Por ejemplo, D. W. Jorgenson y Z. Griliches observaron que “si el producto real y factor real de entrada son considerados con precisión, el crecimiento observado en la productividad total de los factores es insignificante” (1967). En otras palabras, el incremento de la producción real, de 1945 a 1965, se explica casi en su totalidad (96,7 por ciento) por los incrementos en los insumos reales, con un pequeño residual del 3,3 por ciento imputable al cambio tecnológico. Estos hallazgos ponen en duda la idea de

que la tecnología, sin la ayuda del aumento de los flujos de recursos, pueda producir grandes aumentos de la producción. De hecho, la ley de conservación de la materia y la energía por sí misma debería provocar un escepticismo ante la afirmación de que la producción real puede aumentar continuamente sin un aumento en los insumos reales.

Otro punto acerca del rol del residuo de Solow que genera perplejidad es el hecho de que puede que sea la única entidad en economía que se supone que seguirá creciendo para siempre. Resulta cuanto menos curioso, teniendo en cuenta el concepto establecido de “rendimientos decrecientes” en las ciencias económicas. ¿Por qué debería el progreso tecnológico estar exento de esta ley general? Este asunto fue examinado por, por ejemplo, Giarino y Laubergé (1978), en su crítica al modelo LDC. Sus conclusiones fueron que la tecnología sí muestra rendimientos decrecientes. Es decir, el hecho de aumentar las inversiones en investigación no conlleva resultados proporcionales en las mejoras tecnológicas.

Estas conclusiones tienen sentido si se examinan casos prácticos de progreso. Hay muchas tecnologías que han progresado de una manera asombrosa, pero luego esos avances se han ralentizado. Como la fabricación de coches, que pasó de fabricar carros autopropulsados de mediados del siglo XIX a modelos con características muy modernas ya a principios del siglo XX, como el Ford T, cuya producción comenzó en 1908. Después de este periodo de rápido crecimiento tecnológico, la industria automovilística dedicó mucho dinero a I + D, inversión que se mantiene hoy en día. Pero ese gasto no ha vuelto a provocar ninguna revolución en el ámbito del transporte, como la que en su día se produjo con el Ford T. En la década de los cincuenta, las personas esperaban que los coches voladores fueran algo común, pero eso nunca pasó y, probablemente, nunca pasará. En definitiva, la I + D en automovilismo ha seguido un camino claro de rendimientos decrecientes.

Podemos encontrar patrones similares más allá del

automovilismo. Hay cientos de áreas tecnológicas que están progresando lentamente, si es que lo están haciendo, y no es por falta de inversión. Basta con pensar en cómo la esperanza de vida humana, después de un aumento notorio en las últimas décadas, ha dejado de crecer de manera significativa.

Por supuesto, hoy en día existen sectores tecnológicos en I + D que están dando sus frutos y donde los avances son más significativos. Por ejemplo, las comunicaciones, el tratamiento de datos, los robots, etc. La Ley de Moore es bien conocida: aproximadamente cada dos años se duplica el número de transistores en un circuito integrado. Como consecuencia, la potencia informática está aumentando de manera exponencial. Pero nos estamos acercando rápidamente a los límites físicos del tamaño de los transistores, que, en cualquier caso, no podrán tener un tamaño menor al de un átomo. Así que ¿durante cuánto tiempo durará esta tendencia?

Existen evidencias de que el progreso tecnológico, considerado en su conjunto, se está ralentizando. Robert Ayres ha publicado varios artículos sobre este tema (por ejemplo, en 1998 y 2001), utilizando algunas hipótesis sobre la eficiencia general de los procesos tecnológicos, llegando a la conclusión de que el “factor tecnológico” (o residuo de Solow) no crece exponencialmente, sino que sigue una curva logística (por ejemplo, asintótica). En otras palabras, el progreso, al igual que la mayoría de las entidades definidas en la economía, pueden mostrar rendimientos decrecientes.

El trabajo de Ayres ha sido validado por una serie de autores que han informado acerca de un estancamiento o una disminución en el número de patentes publicadas en todo el mundo o en el ratio de gasto por patente (Tainter, 1996; Huebner, 2005; Hogan, 2006; Nordmann, 2008; Staniford, 2010). La disminución del número de patentes no es, por sí misma, un indicador de que el progreso tecnológico se esté ralentizando, pero sí sugiere que hay algún error en la hipótesis de que habrá un progreso exponencial de la ciencia y la tecnología para siempre.

Obviamente, se trata de un tema muy complejo todavía en

estudio. Sin embargo, puede ser una buena idea el relacionar el progreso tecnológico con otros conocidos factores de la teoría económica. Es decir, se debe asumir que el progreso en su conjunto está afectado por rendimientos decrecientes. Por lo tanto, se descarta que la “productividad total de los factores”, o “residuo de Solow”, sea una función continua de crecimiento constante, y que sea posible compensar la disminución de los recursos, la contaminación, la sobrepoblación y todos los problemas existentes hoy en día.

Pero existe otro punto de vista acerca del progreso tecnológico mucho más ambicioso que el que deriva de las suaves curvas de los modelos económicos. Como ejemplo se puede citar el libro de Kevin Kelly, *Out of Control* (Kelly, 1994), donde se puede encontrar una descripción del progreso, formulada como una crítica directa a LDC. En su página 575 se puede leer:

Los modelos de retroalimentación directos, como los mostrados en LDC, pueden lograr conseguir la estabilización (característica de los sistemas vivos), pero no pueden aprender, crecer o diversificarse, tres complejidades esenciales para un modelo de la cultura o la vida que son variables. Sin estas habilidades, el modelo se quedará muy por detrás de la cambiante realidad. Se puede utilizar un modelo sin capacidad de aprendizaje para anticipar el futuro próximo cuando el cambio coevolucionario es mínimo. Pero para predecir un sistema evolucionario, si es que pudiera llegar a predecirse, se requerirá la exquisita complejidad de un modelo de evolución artificial simulado.

Y:

Los LDC no pueden imitar el surgimiento de la Revolución industrial a partir de la era agraria. Tampoco, admite Meadows, “puede coger el mundo desde el momento de la

Revolución industrial hasta lo que sea que venga a continuación”.

Kelly cree que el progreso se produce a pasos agigantados, saltos verdaderamente cuantitativos, que llevan a la sociedad hasta una escalera con etapas cada vez más complejas. Otro ejemplo de este punto de vista se expresa en el siguiente párrafo (Ordway, 1953), que presenta las palabras del presidente de una empresa petrolera:

El hecho parece ser que el primer almacén (de recursos) con el que se encontró el hombre fue solo uno de una serie de almacenes. Mientras consumía el contenido de ese almacén, se percató de que podía fabricar una llave para abrir la puerta a una habitación mucho más grande. Y, mientras consumía el contenido de esta segunda habitación, se dio cuenta de que más allá había otra aún mayor. La habitación donde nos encontramos en el siglo XX es tan inmensa que sus paredes escapan a la vista. Es probable incluso que se encuentre al principio de toda la serie de almacenes. No es inconcebible que todo el planeta, con su tierra, mar y aire, represente la materia prima que la humanidad podrá utilizar con más y más utilidad e ingenio.

Tales “saltos cuantitativos” o “nuevas habitaciones” puede que no sean incompatibles con una curva de progreso de crecimiento exponencial suave. Se podría argumentar que, en algún momento, la función de crecimiento exponencial aumentará tan rápido que, desde el punto de vista humano, parecerá que, literalmente, se dispara hacia el infinito. Este fenómeno se conoce como la “singularidad” (Kurzveil, 2005) o el “Punto Omega” o “La Punta” (Broderick, 2001). Según algunas interpretaciones, este fenómeno llevará a la humanidad a trascender en un estado “transhumano” casi divino.

Aunque se trata de una idea muy antigua, parece que se formuló con un concepto más moderno por Robert Ettinger en su libro *Man into Superman* (Ettinger, 1974). Más tarde, el concepto del transhumanismo fue popularizado por Vernor Vinge (1993) y por libros como *The Great Mambo Chicken*, de Ed Regis (1994), y *Cyberevolution and Future Minds*, de Paul y Cox (1996). El defensor más reciente del concepto de singularidad tecnológica es probablemente Ray Kurzveil (2005).

No se debe descartar la idea de que los seres humanos se conviertan en superinteligentes, en criaturas transhumanas. Pero incluso esas criaturas deberán enfrentarse a limitaciones físicas, al menos mientras vivan en un planeta finito. Por tanto, no basta con hablar con soltura e inspiración sobre “saltos cuantitativos”, “cambios coevolucionarios” o “nuevas habitaciones”. Si los saltos cualitativos en el progreso tecnológico van a invalidar todo el enfoque del estudio de LDC, y no solo posponer lo inevitable, es necesario ser más específicos. ¿Qué tipo de saltos cuantitativos pueden salvar a la humanidad de la contaminación, el agotamiento de recursos y la sobrepoblación? ¿Qué tipo de avances necesitamos para que la economía pueda seguir creciendo, si no para siempre, al menos por un largo periodo?

Curiosamente, la herramienta que permite responder a estas preguntas es simplemente el método de la modelización utilizado en el estudio de LDC; el objeto de las críticas de los optimistas tecnológicos. Es el modelo de LDC, junto con el sentido común y la física básica, lo que permite analizar cómo los efectos de los avances tecnológicos pueden cambiar el destino de la civilización humana. Un buen ejemplo puede ser la energía. ¿Qué pasaría si apareciera una nueva fuente de energía más barata y abundante?

Aunque el modelo de LDC no considera la energía como un parámetro desagregado, se sabe que con más energía es posible extraer minerales de menas con concentraciones menores. Por lo tanto, el resultado final es un mayor flujo de recursos en la economía.

En la primera edición de LDC (Meadows et al., 1972) ya se realizó una simulación sobre este punto, simulación que fue confirmada en las versiones posteriores. El resultado es que la disponibilidad de recursos más abundantes solo pospondría el colapso pero, en cualquier caso, lo acabaría generando como consecuencia de la combinación de una sobrepoblación, el agotamiento de suelo agrícola fértil y la contaminación.

Por supuesto, es posible argumentar que la abundante energía disponible en este escenario permitiría luchar contra la contaminación, tal y como sucede con el CO₂ que provoca el calentamiento global. Esto es, de nuevo, algo que puede ser simulado y que se ha hecho en las diferentes versiones de los estudios de LDC. En uno de los escenarios presentados se asume que la contaminación se puede reducir por un factor de 4 con el aumento de los recursos disponibles, a partir de un avance tecnológico energético. Incluso en este caso, sin embargo, el colapso no se puede evitar, solo se podría retrasar algunos años.

Por otro lado, se puede suponer también que, con suficiente energía, la contaminación al completo puede ser eliminada. Sería el escenario IFI-IFO explicado anteriormente. ¿Pero es un escenario realista desde el punto de vista físico?

La segunda ley de la termodinámica dice que no existe un sistema de producción energética que sea cien por cien eficaz, y que el resultado es el calor residual. Por lo tanto, si se mantiene el aumento de la cantidad de energía producida en la Tierra, con el tiempo la humanidad se encontrará con un problema de contaminación térmica, un calentamiento del planeta como resultado de la actividad humana. La contaminación es un resultado de todo lo que hacemos, incluyendo la lucha contra la propia contaminación.

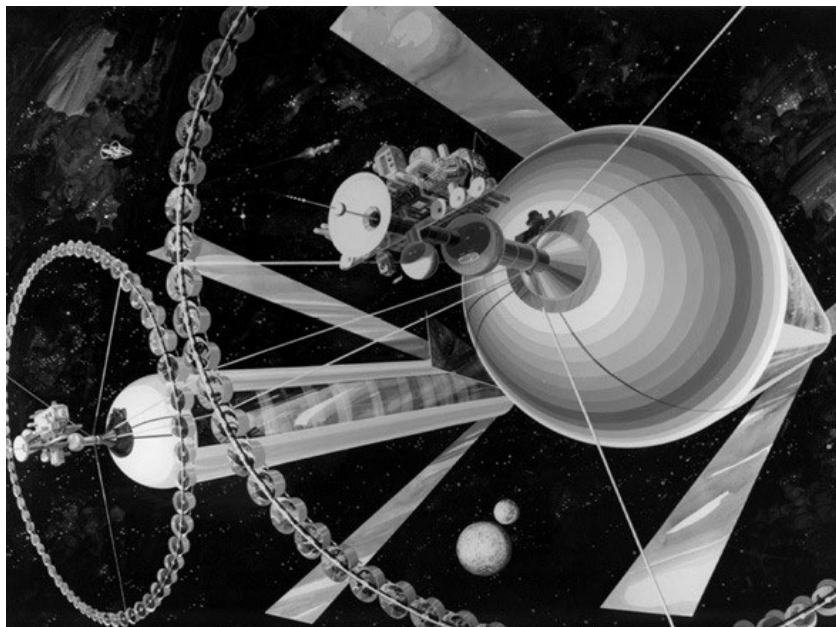
Si se quiere seguir insistiendo en la opción tecnológica, se podría pensar que la contaminación térmica es también remediable mediante el uso de la tecnología: tal vez colocando espejos gigantes en el espacio, o utilizando la ingeniería térmica planetaria para controlar la concentración de gases de efecto invernadero. Pero jugar con los mecanismos que

mantienen los ecosistemas terrestres en funcionamiento es, cuanto menos, arriesgado. Además, se van acumulando las diversas hipótesis sobre tecnologías futuras que no existen actualmente y que quizá nunca existan en el futuro.

Al final, sobre este asunto se puede afirmar que las nuevas tecnologías fácilmente pueden empeorar la situación en lugar de mejorarla, en el sentido de prevenir el colapso, como se muestra en las simulaciones basadas en el modelo World3. Es cierto, sin embargo, que estas consideraciones están fuertemente ligadas a la suposición de que los seres humanos están confinados a la superficie de la Tierra. Esto no es necesariamente cierto y avanzar hacia el espacio permitiría desplazar los límites físicos a la expansión humana.

Figura 1

Representación artística del concepto de hábitats espaciales de Gerard O'Neill. Se trata de enormes cilindros presurizados que pueden situarse en alguno de los puntos estables de Lagrange en el sistema Tierra-Luna, como el L5. Según Gerard O'Neill (1974), estos hábitats podrían albergar millones de seres humanos y remediar el problema de sobrepoblación en la Tierra



Fuente: imagen creada por Rick Guidice para la NASA en 1976 (<http://settlement.arc.nasa.gov/70sArt/art.html>).

Esta idea siempre ha estado presente y, quizá la imagen más detallada acerca de la colonización espacial, haya sido propuesta por Gerard O'Neill en 1974; en parte también como respuesta a la primera edición de LDC. El concepto de O'Neill se basaba en inmensos hábitats presurizados que podían situarse en alguno de los puntos de Lagrange en el sistema Tierra-Luna. Los puntos llamados "L4" y "L5" son estables de por sí, por lo que supondrían la mejor opción para una colonización espacial. De hecho, la idea de O'Neill llegó a ser asociada con el "punto L5" (figura 1).

Algunas de las propuestas sobre la colonización espacial fueron aún más osadas. Ya en 1960, Freeman Dyson propuso reorganizar el Sistema Solar entero, mediante el desmantelamiento de los planetas y la recolocación de la materia obtenida en una inmensa esfera alrededor del Sol que permitiera a los humanos recoger toda la energía solar y

explotarla para sus propios fines. Si tal hazaña fuera posible, la superficie del hábitat humano aumentaría de manera muy significativa en comparación con la ocupación de la superficie de un solo planeta. Otros estudios consideraron incluso la posibilidad de colonizar toda la galaxia (véase el informe de Tarter, 2003), una hazaña que tardaría el orden de un millón de años en realizarse, incluso moviéndonos a la velocidad de la luz.

Aunque el estudio LDC no consideró la expansión hacia el espacio, el modelo World3 puede ser modificado para contemplar esta opción. Así lo hizo Peter Vajk en 1976, creando escenarios que tenían en cuenta las mayores cantidades de materia y energía que estarían disponibles en el espacio. Se basó en el esquema de O'Neill, bajo el supuesto de que sería posible construir una civilización basada solo en los materiales que abundan en los cuerpos espaciales, como la Luna y los asteroides: oxígeno, silicio, hierro, aluminio, magnesio, titanio y otros. Bajo la hipótesis de que la contaminación sería un problema menor en un espacio más amplio como el espacio exterior, Vajk pensó que la economía podría seguir creciendo durante la mayor parte del siglo XXI. También creyó que los problemas de sobrepoblación de la Tierra se resolverían, en parte por la migración hacia el espacio exterior, y en parte por la disminución natural de las tasas de natalidad que se produce cuando la calidad de vida mejora¹.

Tal vez el destino de la humanidad sea realmente la colonización espacial, primero de L5 y luego de toda la galaxia. Pero ¿se dispone de los recursos necesarios? Con la economía mundial supuestamente al borde del colapso, tal y como presentó LDC, parece difícil plantearse la exploración espacial y desarrollarla con la suficiente rapidez como para evitar el agotamiento mineral, el cambio climático y la sobrepoblación. Hoy en día, la carrera espacial ha perdido su impulso y se reduce a una pálida sombra de lo que era en la década de los sesenta. Las expediciones lunares de 1969 resultarían demasiado caras hoy. Con el posible cierre del programa espacial en 2011 (Atkinson, 2010), parece claro que no se

pueden afrontar las mismas inversiones que en los años sesenta. Y es predecible que se necesite una inversión mucho mayor para la construcción de una infraestructura espacial que usara la Luna y los planetas como nuevas reservas de materias primas. Parece inevitable que primero se deban resolver los problemas en la Tierra para, solo después, asumir la colonización del Sistema Solar y, quién sabe, incluso de la galaxia.

Si normalmente se concibe el espacio exterior como la nueva frontera para los seres humanos, existe al menos otra más: la del espacio virtual. Como ocurre con cualquier otra frontera, para su explotación, será necesario hallar la forma de llegar a ella. Esto podría lograrse mediante el uso de la tecnología de “carga mental” o “emulación cerebral” (véase, por ejemplo, Kurzweil, 2005; Sandberg y Bostrom, 2008). La idea es convertir las mentes humanas en programas que se ejecutan dentro de memorias informáticas. Así, los seres humanos podrían ser transferidos al espacio virtual como entidades simuladas. “Ejecutar” un ser humano virtual requeriría menos energía y recursos que los necesarios para mantener a un ser humano real. Esto llevaría a la posibilidad de disponer de más “espacio nuevo” en el espacio virtual. Millones de personas podrían vivir como programas en el espacio virtual, puede que incluso 3.000 o 4.000 millones.

Seguramente, transferir a un ser humano al espacio virtual sería más barato, en términos de gasto energético, que enviarlo al espacio exterior. Pero se trata de posibilidades cuyas consecuencias son difíciles de imaginar. Suponiendo que los seres humanos pudieran ser transferidos al espacio virtual, ¿pararía esto el crecimiento demográfico en el espacio real? ¿Sería posible convencer a la gente para que abandonara sus cuerpos de carne y hueso por unos virtuales? Además, los ordenadores necesitan recursos para funcionar. Si se pretende poner en funcionamiento a 3.000 o 4.000 millones de seres humanos virtuales, surgiría el mismo problema que tenemos actualmente para mantener vivos a cerca de 7.000 millones de seres humanos reales: el problema de los límites de los recursos disponibles.

Así, nos encontramos ante una contradicción fundamental entre el deseo humano de tener más, probablemente arraigado en la forma en que están contruidos nuestros cerebros (Hagens, 2007), y el hecho de que los recursos del mundo son limitados; consecuencia de la forma en que está construido el universo. El “dilema de la humanidad”, tal y como lo definió el Club de Roma (1970) en su fundación, sigue siendo un problema irresuelto. Lo único que podemos decir con certeza es que no hay tecnologías mágicas que nos puedan sacar fuera del callejón sin salida. La única vía es aprender a vivir dentro de los límites.

Notas

1. Vajk fue víctima de la leyenda de las “predicciones erróneas” de LDC y se retractó de su modelo alegando que debía ser entendido como una parodia (Vajk, 2002).

CAPÍTULO 10

EL DEBATE POLÍTICO

La publicación de LDC en 1972 tuvo un fuerte impacto en la opinión pública: tanto que muchos creyeron que podría llegar a descontrolarse. Por ejemplo, K. R. L. escribió acerca de LDC: “[...] los neomaltusianos están obligados a aumentar en número y a estar en lo cierto acerca del final del crecimiento económico en algún momento futuro. En los países industrialmente avanzados esto debería ser relativamente pronto” (Cole et al., 1973: 155).

Esto, por supuesto, no sucedió. En su lugar, a finales de los ochenta y durante los noventa el mundo fue testigo de un rechazo a LDC, rechazo tan completo y penetrante, que resulta incluso sorprendente. Durante los noventa era políticamente incorrecto incluso mencionar el estudio, a no ser que fuera para decir que era incorrecto o que había sido desacreditado.

Solo en los tiempos más recientes parece que ha habido un resurgimiento de LDC, aunque todavía la actitud negativa está muy extendida y probablemente sea predominante. Por lo tanto, tendríamos que plantearnos cómo un estudio, que muchos consideraban una revolución científica que cambiaría el mundo, terminó siendo totalmente rechazado o incluso ridiculizado. Para encontrar una respuesta será necesario revisar la vieja literatura con el fin de identificar los puntos de inflexión de la batalla de ideas que tuvo lugar desde principios de los setenta hasta la actualidad.

Las críticas a la primera edición de LDC, de 1972, raramente se basaban en argumentos puramente científicos, sino en “reacciones viscerales”, que muchas veces eran una manifestación del “efecto Casandra”, es decir, la tendencia de las personas a rechazar o dudar de las malas noticias.

Un ejemplo de esta reacción emocional, que han sufrido incluso científicos e investigadores, es la reacción manifestada por Paul Krugman y su entonces principal investigador,

William Nordhaus, ante la publicación de Jay Forrester titulada World Dynamics de 1971:

Se trata de una historia relacionada con la arrogancia de la ciencia: Forrester, un eminente profesor de ingeniería, decidió probar suerte en el área de la economía y básicamente dijo: “¡Voy a hacer economía usando ecuaciones! ¡Y las realizaré con ordenador! ¡Estoy seguro de que esos estúpidos economistas nunca han pensado en ello!”. Y así, nunca se acercó al lado este del campus para preguntar si, de hecho, algún economista había jamás pensado en ello y qué había aprendido (Krugman, 2008).

Este es un buen ejemplo que ilustra las reacciones a la defensiva que provocó el estudio de LDC en varios campos científicos, en particular en la economía. Krugman no hizo referencia a si Forrester estaba en lo cierto o no, simplemente se ofende porque alguien que no era economista se había atrevido a hacer economía

1.

En muchos casos, esta reacción desembocaba en un debate polarizado con un trasfondo político claramente detectable, aunque rara vez explícito. En ocasiones, en cambio, el carácter político de las críticas resultaba obvio, incluso en los artículos de revistas científicas. El hecho de definir a los autores de LDC como interesados en revivir las ideas maltusianas (como hicieron por ejemplo Nordhaus [1973] y Pavitt [Cole et al., 1973]) fue claramente una acusación política.

Podemos encontrar un ejemplo del trastorno de personalidad múltiple (política y científica) que provocó LDC en Models of Doom (Cole et al., 1973). El libro está dividido en dos secciones: una dedicada a un análisis científico de los métodos y resultados de LDC; y otra titulada “El trasfondo ideológico”. Incluso los defensores del libro parecen sospechar que la

discusión en esta sección se estaba descontrolando, en cierta forma. El autor del prefacio, Asa Briggs, dijo: “se nos sugirió que, debido a su carácter especulativo y controvertido, estos capítulos debían ser omitidos” (p. 9 de la edición estadounidense).

Pero ninguno de los cinco ensayos de la sección “El trasfondo ideológico” fue omitido y entonces la discusión derivó en acusaciones políticas y teorías conspiratorias. Los autores de LDC fueron acusados de tener motivos ocultos, de ignorar los intereses de los pobres, de trabajar para una dictadura mundial, de querer abolir la democracia y sustituirla por una “tecnocracia” y, según el ensayo final de Marie Jahoda (titulado “Postscript to Social Change”), de tener una “actitud irracional y milenaria” y de “escapismo”.

Esta sección de Models of Doom está ya totalmente obsoleta y tiene poco interés, excepto como indicador de la actitud que se estaba desarrollando en el debate desde su inicio. Las emociones estaban a flor de piel y eso llevó a muchos a dejarse llevar, alejándose de las normas del debate científico.

Un buen ejemplo de un debate científico que salió mal es el estudio de Robert Golub y Joe Townsend publicado en Social Studies of Science (Golub y Townsend, 1977). Según los autores, el estudio de LDC fue el resultado del intento de las empresas multinacionales de adquirir el control de la economía mundial, incluso a costa de la destrucción de los Estados nacionales. Para ello, dijeron las multinacionales crearon el Club de Roma como un mecanismo para proponer y, tal vez en el futuro, imponer una serie de políticas “sin crecimiento” o de “crecimiento cero” que repriman cualquier intento de los países en desarrollo de crecer más allá de su condición de subordinación. Según Golub y Townsend, el trabajo del Club de Roma podría llegar a generar “una especie de dictadura militar fanática”.

No hace falta decir que Golub y Townsend no pudieron aportar prueba alguna de sus acusaciones. Para dar muestra del tono del artículo, a continuación se muestra uno de sus párrafos:

LDC predijo una crisis energética, reforzada por la contaminación y la sobrepoblación, dentro de los próximos 30 a 50 años. Sorprendentemente, la crisis pareció surgir en menos de dos años. De hecho, las compañías petroleras estaban preparando algún tipo de crisis mucho antes de LDC.

Esta declaración es un buen ejemplo de lo mucho que la realidad se puede tergiversar para adaptarla a una teoría de la conspiración. Si el grupo de LDC había desarrollado sus modelos para predecir una crisis que estaba siendo creada artificialmente, seguramente podría haber manipulado sus cálculos de tal manera que pudieran predecir la crisis para cuando surgiera y no para 30 o 50 años después. Que tal artículo pudiera ser publicado en una revista de referencia muestra cómo el debate se había descontrolado.

Con el tiempo, la discusión política sobre LDC se hizo más dura y hostil, con algunas críticas muy agresivas al estudio, que surgieron en la década de los ochenta. Julian Simon atacó al estudio en su libro *The Ultimate Resource* (1981), donde acusó a Aurelio Peccei de ser “un mentiroso” y de haber inventado el estudio LDC con el fin de promover su programa de dominación del mundo. Dos años más tarde, Lyndon Larouche publicó un libro titulado *There are No Limits to Growth* (1983) en el que, entre otras cosas, acusaba al Club de Roma de ser una sociedad secreta cuyo objetivo era el exterminio de las “razas más oscuras”.

A día de hoy resulta difícil evaluar con exactitud la eficacia de estos ataques para destruir el prestigio del Club de Roma y del estudio LDC. En la década de los ochenta, Julian Simon se había ganado una cierta reputación como doomslayer (apocalíptico) y sus libros se vendían bien entre el público general. Lyndon Larouche, en cambio, se mantuvo siempre como el portavoz de las opiniones más extremistas. Sin embargo, su libro de 1983 puede haber sido el origen de una leyenda que, hoy en día, se puede encontrar fácilmente en la

web y que acusa a Aurelio Peccei de haber encargado la fabricación del virus del sida como una manera de reducir la población mundial. Sobra decir que Larouche no aportaba ninguna prueba a estas acusaciones.

En general, durante la década de 1980 las cuestiones planteadas por el estudio de LDC parecían dejarse de lado por la actitud optimista que comenzó a extenderse como consecuencia del final de la crisis del petróleo que se había iniciado a principios de los setenta. A mediados de los ochenta los precios del petróleo se derrumbaron por la aparición en los mercados del crudo procedente de Oriente Medio y del mar del Norte. La mayoría de los productos minerales habían seguido la tendencia de precios del crudo, y la apuesta que hizo Julian Simon con Paul Erlich en 1980 acerca de la disponibilidad de recursos en el futuro tuvo una cobertura mediática considerable (Regis, 2004), incluyendo un especial en un artículo despectivo que se publicó en 1990 en el New York Times por Tierney.

Todo esto pudo refrescar la memoria de la gente. Aquellos que habían leído Los límites del crecimiento a principios de 1970 recordaron vagamente que el libro había predicho una catástrofe futura como consecuencia del agotamiento del petróleo y otros minerales. Si la crisis del petróleo de 1973 parecía para muchos la crisis predicha por LDC, el fin de la crisis a mediados de 1980 no era más que la refutación de las mismas predicciones. Poca gente parecía tener el tiempo o la fuerza de voluntad suficiente para desempolvar el viejo libro y comprobar si dicha interpretación era correcta.

Por ejemplo, en 1987, George J. W. Goodman (Goodman, 1987) (escribiendo bajo el seudónimo de Adam Smith) cometió por lo menos cinco (!) errores² en una sola frase sobre LDC cuando escribió en el New York Times que “diez años atrás, el Club de Roma, y una serie de pronosticadores económicos, predecirían la escasez de todo. El petróleo subiría a 200 dólares por barril y el planeta estará hambriento”.

Así, el estudio LDC podría simplemente haber sido olvidado en el optimismo generalizado de los años 1980 y 1990, si no fuera

por un hecho concreto que parece haber catalizado la agresiva demolición que estaba sufriendo. Este “punto de inflexión” en la percepción pública llegó cuando, en 1989, Ronald Bailey publicó un artículo titulado “Dr. Doom” en Forbes. Aunque el título se refiere a Jay Forrester, el padre de la dinámica de sistemas, el ataque fue, sobre todo, contra el libro LDC, al que Bailey describió como, “todo lo desatinado que es posible ser”. Para probarlo Bailey dijo que:

El estudio de Los límites del crecimiento predijo que, según las tasas de crecimiento de 1972, el mundo se quedaría sin oro en 1981, sin mercurio en 1985, sin estaño en 1987, sin zinc en 1990, sin petróleo en 1992, sin cobre ni gas natural en 1993.

Más adelante, Bailey repitió las mismas críticas en su libro Ecoscam, publicado en 1993. Las afirmaciones incluidas en el libro tuvieron un éxito increíble y todavía hoy se pueden ver plasmadas de manera literal o con mínimas variaciones por toda la web. Supuso el punto de partida de la caída de LDC que, a partir de ese momento, comenzó a ser tachado por la prensa de “erróneo”.

Ahora bien, ¿dónde encontró Bailey esas “predicciones” que atribuye a LDC? En la edición de 1972 no se pueden encontrar tales afirmaciones. Más bien, Bailey debió revisar una interpretación errónea de LDC (Passel et al., 1972) que trabajaba con los datos de la tabla 4 del segundo capítulo del libro de 1972, tabla que enumera la duración prevista de algunos minerales, calculada en función de algunas hipótesis. La tabla (incluidas sus referencias) ocupa cinco páginas del libro. Se presenta a continuación una versión simplificada, que muestra solo los recursos mencionados en el artículo de Bailey de 1989 (tabla 1):

Tabla 1

Tabla simplificada de la tabla 4 del libro de LDC de 1972.

1	2	3	4	5	6	7
Recurso	Reservas mundiales	Índice de reservas mundiales	Índice de reservas mundiales	Índice de reservas mundiales	Índice de reservas mundiales	Índice de reservas mundiales
Oro	353×10^6 onzas troy	4,1	9	29		
Mercurio	$3,34 \times 10^6$ lb	2,6	13	41		
Estaño	$4,3 \times 10^6$ t	1,1	15	61		
Zinc	123×10^6 lb	2,9	18	50		
Petróleo	455×10^9 barriles	3,9	20	50		
Cobre	308×10^6 lb	4,6	21	48		
Plomo	91×10^6 t	2	21	64		
Gas natural	$1,14 \times 10^{13}$ pies cúbicos	4,8	22	49		

La tabla tiene seis columnas (en la tabla original hay más columnas, que muestran la distribución geográfica de los recursos). La cantidad de reservas conocidas se muestra según los datos de la USGS. La previsión de la duración de las reservas se ha calculado en base a tres supuestos:

Columna 3: la producción continúa con un ritmo constante (“índice estático”).

Columna 5: la producción aumenta a un ritmo exponencial (dado en la columna 4).

Columna 6: la producción aumenta a un ritmo exponencial, como en la columna 5, pero con las reservas aumentadas en un factor de 5.

La tabla original enumera muchos más productos minerales, pero en esta tabla solo se muestran las escogidas por Bailey. También seleccionó solo la duración mostrada en la quinta columna. Si se suman los números indicados en la tabla y la fecha de publicación del libro (1972), se obtiene el año en que cada recurso (oro, mercurio, estaño, etc.) debería haberse agotado, según las interpretaciones de Bailey.

Pero ¿por qué Bailey (y anteriormente Passel y otros) escogió solo esos productos y solo los números de la quinta columna y no los de la tercera o la sexta? Por supuesto, porque solo esos minerales y esos números de la quinta columna permitían “demostrar” que las “predicciones” de LDC eran excesivamente pesimistas o erróneas.

Aparte de la recolecta de datos, el problema que tiene la interpretación de Bailey es que en ninguna parte del libro se indicaba que los números debían considerarse como predicciones. Debería ser obvio que la tabla 4 se colocó solo para ilustrar el efecto de una hipótesis: la del crecimiento

exponencial continuo de la explotación de los recursos minerales. Los propios autores rechazaron esa hipótesis por ser poco realista y dedicaron el resto del libro al desarrollo de modelos mejores. De hecho, en la página 633 de la edición de 1972 de LDC se dice claramente que:

Por supuesto que la disponibilidad real de los recursos no renovables en los próximos decenios estará determinada por factores mucho más complicados que pueden expresarse mediante el índice estático de reservas o el índice exponencial de las mismas. Este problema lo hemos estudiado con un modelo muy detallado que examina las muchas interrelaciones que existen entre factores tales como la variación de la ley de las menas, los costes de producción, la nueva tecnología minera, la elasticidad de la demanda del consumo y la sustitución de otros recursos.

Por lo tanto, el acusar a los autores de LDC de “predicciones erróneas” sobre la base de la tabla 4 es como acusar a Euclides de no saber geometría a partir de una de sus manifestaciones basadas en el método reductio ad absurdum. Si leemos con detalle el primer libro de LDC, nos encontramos con que ninguno de los escenarios desarrollados indica que en el mundo no debería haberse “agotado” nada antes del final del siglo XX.

Pero el párrafo del artículo de Bailey de 1989 tuvo un éxito extraordinario y se difundió en la prensa como lo hacen las leyendas urbanas. Incluso alcanzó la literatura científica. En la sección titulada “Comentarios y discusión” adjuntos a un documento de 1992 de William Nordhaus, nos encontramos con un texto de Robert Stavins, un economista de la Universidad de Harvard, donde se puede leer:

Si hoy en día comprobamos el resultado de las predicciones de

la primera edición de LDC, veremos que (según sus estimaciones) tanto el oro, como la plata, el mercurio, el zinc y el plomo deberían haberse agotado y que el gas natural debería hacerlo en los próximos ocho años. Por supuesto, esto no ha sucedido.

Parece obvio que Stavins se refiere al artículo de Bailey de 1989, aunque no lo cita. Evidentemente, Stavins no se molestó en revisar si esa fuente era fiable. Así, con este texto, la leyenda de las predicciones erróneas alcanzó incluso revistas académicas que utilizan la evaluación de pares.

La década de los años noventa supuso una verdadera avalancha de críticas a LDC y sus autores. Uno tras otro, científicos y periodistas, y todo aquel que se sentía con derecho a debatir el tema, comenzaron a repetir los mismos argumentos una y otra vez: el Club de Roma (o LDC) había predicho una catástrofe que no había sucedido, por lo que todo el estudio estaba equivocado.

Existen innumerables ejemplos de la difusión de esta leyenda. Por ejemplo, se presenta a continuación un párrafo publicado en *The Economist* en 1997 (*The Economist*, 20 de diciembre de 1997, p. 21).

De acuerdo con el Club de Roma, las reservas (de petróleo) deberían tener un descubierto de 50.000 millones de barriles en 1990. De hecho, en 1990 las reservas sin explotar deberían ascender a 900.000 millones de barriles, sin contar las pizarras bituminosas, de las cuales un solo depósito en Alberta contiene más de 550.000 millones de barriles. El Club de Roma cometió los mismos errores en sus predicciones para el gas natural, la plata, el estaño, el uranio, el aluminio, el cobre, el plomo y el zinc.

A continuación se presenta otro ejemplo, esta vez del popular libro *The Skeptical Environmentalist*, de Bjorn Lomborg (2001). En su página 137 se encuentra el siguiente párrafo, que repite prácticamente de manera literal el texto de Bailey de 1989:

Seguramente la serie de predicciones más famosa provenga del best seller de 1972, *Los límites del crecimiento*, que afirmaba que se agotarían la mayoría de los recursos. De hecho, se predijo que el oro se acabaría en 1981, la plata y el mercurio en 1985 y el zinc en 1990.

La idea de que LDC había realizado predicciones erróneas se había extendido tanto y estaba tan asumida que muchas veces ni siquiera era necesario ofrecer argumentos. Para mucha gente, el estudio de LDC era simplemente erróneo. El premio Nobel Milton Friedman usó el término “estúpidas proyecciones” en una entrevista publicada por Carla Ravaoli en 1995 en su libro *Economists and the Environment* (p. 33) (Ravaoli y Ekins, 1995).

Friedman:

Si estuviéramos viviendo del capital, el precio de mercado aumentaría. El precio de los recursos realmente limitados aumentará con el tiempo. El precio del petróleo no ha ido en aumento, por lo que no estamos viviendo del capital. Cuando esto ya no sea así, el sistema de precios hará una señal y el precio del petróleo subirá, como siempre sucede con un recurso limitado.

Ravaoli:

Por supuesto, el descubrimiento de nuevos pozos de petróleo ha llevado a la ilusión de petróleo ilimitado...

Friedman

: ¿Por qué dice una ilusión?

Ravaoli

: Porque sabemos que es un recurso limitado.

Friedman

: Disculpeme, pero no es un recurso limitado desde el punto de vista económico. Muchos de los errores que la gente comete vienen de ahí. Como las estúpidas proyecciones del Club de Roma: utilizaron un enfoque puramente físico, sin tener en cuenta el precio. Hay muchas fuentes de energía, algunas de las cuales resultan demasiado caras de explotar hoy en día. Pero si el petróleo escasease se explotarían. Pero el mercado, que es afortunadamente capaz de registrar y utilizar el conocimiento ampliamente disperso y la información de personas de todo el mundo, tendrá en cuenta dichos cambios.

La difusión de la leyenda de las “predicciones erróneas” llevó a veces a un comportamiento agresivo, aunque los autores de LDC nunca informaron de haber recibido amenazas físicas o incluso de muerte, como sí sucedió con los climatólogos tras el caso Climategate de 2009 (IPCC, 2009; Fisher, 2010). En cualquier caso, en Internet se pueden encontrar algunos testimonios cuanto menos preocupantes. Por ejemplo, Steven White (2002) sugirió que los autores de LDC, por haber realizado predicciones “tremendamente equivocadas”, “debían ser enviados a los bancos de órganos”.

Sería necesario mucho espacio para contar todas las historias surgidas en torno a las “predicciones erróneas”. Basta decir que en diciembre de 2010, una búsqueda en Google de los términos “Club de Roma”, “error” y “predicciones” ofrecía alrededor de 17.000 resultados. De estas entradas, muchas informaban de esta leyenda negra como algo cierto. Algunas de las entradas son muy recientes (por ejemplo, Ball, 2010) y

otras aparecen incluso en revistas de referencia (Popper et al., 2005; Radetzki, 2010). Parece ser que las viejas leyendas negras nunca mueren.

En cierta medida, parece lógico que el declive del estudio LDC fuera una consecuencia natural del humor optimista generalizado que se estaba viviendo a finales de los ochenta acerca del agotamiento de los recursos. En cualquier caso, si comparamos la historia de LDC con otras críticas recientes a trabajos científicos (McGarity y Wagner, 2008; Hoggan, 2009; Oreskes y Conway, 2010), todo parece apuntar a que las acciones de lobby pudieron jugar un importante papel en la creación de una opinión pública negativa hacia el informe, e incluso creado y difundido las críticas de Bailey (Bailey, 1989).

El debate mediático normalmente incluye lobbying en donde grupos de presión promueven activamente sus intereses. Aunque no hay nada ilegal en el lobbying político, muchos problemas pueden surgir cuando este consiste en difamaciones o ataques personales, especialmente si se basan en información inventada, o por lo menos no se han comprobado los datos. Estos métodos son conocidos como técnicas de spin, una forma de propaganda destinada a la manipulación de la opinión pública (Alasdair, 2005; Gore, 2007; Hoggan, 2009; Oreskes y Conway, 2010). No existen pruebas de este tipo de lobbying en el caso de LDC, pero sí es posible examinar otros casos conocidos que proporcionen elementos comunes que permitan establecer hipótesis razonables sobre este asunto.

Uno de los casos recientemente documentados es el descrito por Kimm Groshong (2002) acerca del libro *Silent Spring*, de Rachel Carson (1962). Carson critica el uso excesivo de DDT y otros pesticidas artificiales, algo que iba en contra de los intereses de un sector de la industria química. Como consecuencia de ello, la industria reaccionó con una agresiva campaña de relaciones públicas. Tal y como se incluye en el texto de Groshong:

Las actas de una reunión de la Manufacturing Chemists'

Association, Inc., del 8 de mayo de 1962, demuestran esta curiosa postura. En su discusión acerca del contenido de la serie de artículos de Carson para el New Yorker se incluyen las siguientes notas oficiales: la asociación tiene bajo seria consideración el asunto y ha programado una reunión del comité de relaciones públicas para el próximo 10 de agosto, donde se discutirán las medidas que se deben tomar para reorientar el asunto hacia una perspectiva pública apropiada. Se está desarrollando un programa de la asociación para ser gestionado en forma de cooperativa con otros grupos industriales interesados.

Groshong prosigue detallando cómo la asociación seleccionó siete puntos de crítica sobre Silent Spring y procedió a difundir estos puntos en la prensa. La difusión resultó bastante exitosa e, incluso hoy en día, se acusa a Rachel Carson de haber “matado a más gente que los nazis” por su oposición al uso excesivo del pesticida DDT (Oreskes y Conway, 2010).

Por supuesto, nadie duda del derecho de la industria química a hablar de este asunto. El problema es que el público no era consciente de que muchos de los comentarios críticos de Silent Spring fueron el resultado de un esfuerzo conjunto (y de pago), específicamente diseñado para influir en la actitud pública.

El caso de Silent Spring es posiblemente el primer caso conocido sobre un lobby industrial que organiza una campaña mediática en contra de un estudio científico. Un caso posterior y más conocido es el de los efectos nocivos del tabaco. La discusión, iniciada en los años sesenta (Diehl, 1969), se extendió durante décadas, alcanzando un pico en la década de los ochenta. Como parte de un acuerdo pactado en 1998, la industria del tabaco se vio obligada por el Gobierno de los EE UU a desclasificar todos los documentos relativos al debate. Esto permitió documentar varios ejemplos que la industria utilizó para desacreditar a la ciencia y los científicos. Algunos de ellos fueron descritos, por ejemplo, por Thomas McGarity y Wendy Wagner en *Science Bending* (2008), por David Michaels en *Doubt is their product* (2008) y por Naomi Oreskes y

Richard Conway en Merchants of Doubt (2010).

Un ejemplo típico de la campaña mediática orquestada por el lobby tabacalero es el ataque contra los resultados sobre el fumador pasivo, publicados por Takeshi Hirayama en 1981 (Hirayama, 1981). Estos resultados demostraban que el riesgo de un no fumador de padecer cáncer aumentaba considerablemente con la convivencia cercana a un fumador. Obviamente, se trataba de malas noticias para la industria tabacalera, por lo que la reacción fue rápida y agresiva. El ataque de la industria se centró en alegar fallos en el tratamiento estadístico de los datos en el documento de Hirayama. En realidad, todo de lo que la industria disponía era de la opinión de algunos expertos externos que decían que era “posible” que Hirayama hubiera cometido errores, pero eso fue suficiente para desatar toda la ofensiva mediática con el único propósito explícito de “desacreditar el documento de Hirayama”. Según un informe de McGarity y Wagner (2008), el presidente del US Tobacco Institute aprovechó un momento en el que Hirayama estaba fuera de su oficina, en una reunión, para enviar un telegrama al director del instituto donde este trabajaba, donde se comentaba los errores “muy graves” descubiertos en su documento. En el informe de McGarity y Wagner (2008) también se puede leer lo siguiente:

Mientras una copia del telegrama fue enviada al Dr. Hirayama, al British Medical Journal y a la prensa, un comunicado de prensa simultáneo anunciaba que el Dr. Mantel había “confirmado la existencia de un error matemático fundamental” en el estudio de Hirayama. El departamento de relaciones públicas del Instituto también distribuyó una copia de las críticas de Mantel a representantes reunidos bajo la orden de “visitar personalmente más de 200 organizaciones informativas por todo el país” el viernes 12 de junio. Un centenar de clips informativos fueron enviados a las televisiones locales y 400 cintas de audio a emisoras radiofónicas.

El bombardeo de relaciones públicas tuvo su efecto deseado y las noticias acerca del “error” de Hirayama aparecieron en la mayoría de los medios de comunicación de los EE UU. Se dijo que cerca del 80 por ciento de la población estadounidense estuvo expuesta a estas noticias.

Hirayama pudo más tarde demostrar que el tratamiento que le había dado a los datos era correcto y su documento está hoy considerado “un clásico que ha resistido la prueba del tiempo” (Ong y Glanz, 2000). Sin embargo, el US Tobacco Institute ya había dañado seriamente la reputación de Hirayama y arrojado dudas sobre el valor de su estudio, dudas que persisten hoy en día.

Existen muchos más ejemplos sobre los métodos utilizados contra estudios científicos. Otro caso interesante es el llamado “invierno nuclear” (Turco et al., 1983), que describe cómo una gran guerra nuclear podía producir un efecto de enfriamiento global que podría destruir fácilmente la civilización humana. El estudio fue atacado por todos los sectores industriales y militares que resultaban obviamente dañados por el mismo. Los resultados fueron demonizados hasta tal punto que fueron incluidos en la revista Discovery entre “los 20 mayores errores científicos de la historia” (Starr, 2009). Más tarde, sin embargo, fueron ampliamente confirmados (Robock et al., 2007; Turco, 2007; Starr, 2009).

Otro caso más actual sobre la demolición de resultados científicos es el reciente ataque contra la ciencia climatológica y los científicos climatólogos que se ha centrado en “la controversia del palo de hockey”, la reconstrucción de las temperaturas en los últimos 1.000 años (Man et al., 1998). La solidez de los resultados del informe fue conformada en estudios posteriores (por ejemplo, la National Academy of Sciences, 2006). Sin embargo, el estudio fue sometido a una campaña mediática denigrante, incluido un libro dedicado íntegramente a los fallos alegados (Montford, 2010). El debate degeneró rápidamente en ataques personales contra el principal autor del estudio, Michael Mann, quien informó de haber recibido todo tipo de insultos y amenazas, incluyendo

amenazas de muerte. Los ataques se extendieron a los colegas de Mann y a la ciencia climatológica en general, que culminó con el robo de datos desde el servidor de la Climate Research Unit de la Universidad de East Anglia. El escándalo fue conocido como Climategate (IPCC, 2009; Fischer, 2010) y llevó a una mayor demonización de la ciencia climatológica y de los científicos climatólogos.

A partir de estos ejemplos, se puede afirmar que existe un patrón en las campañas mediáticas de spin. Consiste en encontrar un punto débil en el estudio científico que se pretende atacar y concentrar toda la atención de los medios sobre este punto específico, dejando de lado todos los elementos que, en cambio, apoyarían el estudio. Aunque el punto débil es solo eso, un punto débil, con el suficiente ruido de los medios de comunicación se puede concentrar la atención pública en él y usarlo para demoler incluso las teorías y modelos más sólidos.

En el caso de LDC se siguió el mismo patrón: buscar un solo error, no importa lo pequeño que sea o incluso si es inexistente, y usarlo para desacreditar a todo el estudio y a sus autores. Esto es lo que hizo Ronald Bailey (1989) al coger una mala interpretación de otros autores (Passel et al., 1972) para encontrar un error, suficiente para desacreditar todo el estudio. Que no existiera tal error no era importante para semejante cometido.

No existe ningún documento que demuestre que hubo una reunión conspiratoria de la industria extractora contra LDC, de la manera que Groshong (2002) explica que sucedió para el caso de Rachel Carson con Silent Spring. Lo que sí se puede afirmar es que las acciones denigrantes contra LDC tuvieron un gran éxito, ya que entraron en juego algunas de las características innatas de la mente humana; en particular la tendencia humana de creer lo que se quiere creer y viceversa. Es, en definitiva, el efecto Casandra (y, por supuesto, Casandra estaba en lo cierto).

Así, con la demonización de LDC se perdieron varias décadas durante las cuales los resultados y los métodos del estudio

fueron expulsados fuera de la frontera de lo políticamente correcto y de las ideas científicas, al igual que de la política y del escenario mundial. Esto podría cambiar en el futuro, pero el daño hecho difícilmente podrá ser reparado.

Notas

1. Debe tenerse en cuenta, además, que Krugman parece olvidar que, cuando Forrester tuvo la idea de “hacer economía con ecuaciones” a mediados de los sesenta, los ordenadores digitales eran todavía tal novedad que Forrester tuvo que utilizar un ordenador especial desarrollado por él mismo. Así, resulta bastante improbable que algún economista hubiera “pensado en ello” o “hubiera aprendido algo sobre ello” antes de Forrester.

2. 1) El confundir al Club de Roma con los autores de LDC, 2) que el libro hubiera sido escrito 10 años antes y no 15, 3) que LDC hubiera predicho los precios del petróleo, 4) que LDC hubiera predicho la escasez mientras Goodman estaba escribiendo y 5) que LDC hubiera predicho que las hambrunas ocurrirían pronto.

3. Nota de traducción: página 81 de la versión española, Ed. Fondo de Cultura Económica, México, 1972.

CAPÍTULO 11

EL RETORNO DE La modelización DEL MUNDO

El eclipse de LDC se prolongó durante un largo periodo coincidente aproximadamente con la década de los noventa. Aparte de un breve resurgimiento como resultado de la publicación de la segunda versión de LDC (Meadows et al., 1992; Nordhaus, 1992a), durante este periodo el debate científico acerca de LDC era prácticamente nulo, y muy pocos estudios parecían seguir el tema de la modelización del mundo en general. La controversia generada con LDC provocó que los científicos desconfiaran y rechazaran estudiar un tema para el que era difícil, si no imposible, conseguir fondos y en el que los resultados obtenidos podían generar rechazo en las revistas científicas. En la prensa generalizada prácticamente solo se citó a LDC para definirlo como un estudio fallido, si no como un intento intencionado de engañar al público. Incluso los movimientos de protección del medio ambiente, con sus diversos matices y versiones, se centraron en conceptos como “desarrollo sostenible” (Naciones Unidas, 1987) que, desde cierta perspectiva, podían entenderse contrarios a la idea de que existen límites al crecimiento.

Sin embargo, el mundo siempre está en permanente transformación y los cambios que tuvieron lugar al finales de los noventa y comienzos de 2000 dieron lugar a una visión diferente de la situación. Si los noventa habían sido los años de *The End of History* (Fukuyama, 1992), los ataques del 11-S (11 de septiembre de 2001) demostraron que la historia no había terminado. Todo lo contrario, una nueva era histórica estaba comenzando, una en la que los “dividendos de la paz”, que muchos habían visto como el resultado de la caída de la Unión Soviética, iban a ser utilizados en una nueva ronda bélica contra nuevos enemigos.

Los años noventa también fueron los tiempos de una “nueva economía”, de la idea de que la tecnología de Internet y de la información traería una nueva era de prosperidad para todo

aquel que pudiera crear un sitio “puntocom”. Fue un momento de optimismo no muy diferente al generado por la novedad de la energía nuclear en la década de los cincuenta. Pero el nuevo siglo trajo una desilusión fundamental sobre la capacidad de la economía para seguir creciendo para siempre. El mercado de valores NASDAQ se desplomó en el año 2000, acabando con la burbuja “puntocom”. El índice Dow-Jones se estrelló en 2008, generando el colapso de los mercados financieros del mundo. Algunos consideraron la crisis financiera que comenzó en 2008 similar a la que marcó el comienzo de la Gran Depresión de 1929. Esta desilusión se vio reforzada por la segunda crisis del petróleo, que culminó con el disparo de los precios del petróleo de 2008, que llegó al máximo histórico de casi 150 dólares por barril.

Todo esto era un recordatorio de que los Casandras de los años setenta, los autores de LDC, podían no haber estado tan equivocados como la gente pensaba. Su énfasis en algunos problemas básicos, como el agotamiento de recursos, la contaminación y la sobrepoblación no había sido tan inapropiado. Aunque los tres problemas se habían olvidado en el optimismo de los noventa, volvieron con una venganza en el nuevo siglo.

Con la llegada del siglo XXI, debido a las preocupaciones sobre el agotamiento del crudo, resurgió el interés por el futuro o los recursos minerales. Las nuevas estimaciones comenzaron en 1998, con un documento clave publicado por Colin Campbell y Jean Laherrere en Scientific American. En dicho estudio, los autores retomaron el modelo propuesto por Marion King Hubbert (1956) para describir la producción mundial de petróleo. Propusieron que el pico mundial de la producción de petróleo (pico del petróleo) ocurriría en algún momento durante la primera década del siglo XXI, seguramente alrededor de 2005. Hoy en día no es posible decir con certeza que el pico ocurrió sobre esa fecha; aunque puede ser el caso (por ejemplo, Aleklett et al., 2010). Lo único seguro es que la producción mundial de petróleo convencional se ha mantenido estática, o puede que haya disminuido levemente, desde 2005, mientras que la de “todos los líquidos” (los combustibles

obtenidos de fuentes como las arenas de alquitrán) no ha aumentado de manera significativa, más allá del promedio, desde 2004. Estos datos otorgan credibilidad a la idea de que el mundo pronto se enfrentará a una reducción de la disponibilidad de combustibles fósiles líquidos.

El pico del petróleo nunca ha sido una teoría dominante, pero nunca fue objeto de los ataques políticos que habían reducido a LDC al nivel de ser una idea marginal para lunáticos. Así, la difusión de los estudios sobre el agotamiento del petróleo ayudó a cambiar el clima intelectual sobre el agotamiento de los minerales en general, como lo demuestran varios estudios sobre la materia (véase, por ejemplo, Sohn, 2005; Tilton, 2006; Gordon et al., 2006; Bardi y Pagani, 2007; Bardi, 2008a; Diederer, 2010; Valero y Valero, 2010; Bihouix y De Guillebon, 2010; Rademaker y Korooshy, 2010).

En los últimos tiempos, los temores relacionados con el agotamiento de los minerales se han agudizado debido al caso de las tierras raras, minerales de gran importancia para la industria electrónica que se obtienen, casi exclusivamente, de las minas ubicadas en la República de China (Bradsher, 2010). Se ha descubierto que muchos otros minerales ya han alcanzado su pico y su producción está disminuyendo (Bardi y Pagani, 2007). El agotamiento, de hecho, no afecta solo a los recursos minerales, sino también a aquellos que normalmente se consideran como “renovables”. Por ejemplo, se ha informado de que la tasa de pérdida de suelo fértil en Europa es de un promedio de 3-40 veces más rápida que el valor que sería sostenible (Verheijen et al., 2009). La pérdida de suelo fértil provoca una creciente necesidad de uso de fertilizantes artificiales que solo pueden producirse a partir de combustibles fósiles, que también están sufriendo una crisis de producción. El agotamiento de los recursos es, por tanto, un problema generalizado que no puede seguir pasando desapercibido.

Otra área donde los conceptos expresados en LDC están volviendo a ganar terreno es la de la contaminación. Es cierto que en el pasado ha habido numerosos éxitos en la lucha

contra la contaminación local como, por ejemplo, el humo en las zonas urbanas. Sin embargo, cuando se trata de luchar contra la “contaminación persistente”, la situación es diferente. En este caso, el contaminante persistente más importante es el exceso de dióxido de carbono, CO₂, en la atmósfera, la causa principal del calentamiento global. La concentración de CO₂ continúa aumentando, pese a cualquier intento de limitar las emisiones generadas por los combustibles fósiles, con las consecuentes manifestaciones del cambio climático cada vez más visibles en huracanes, incendios forestales, olas de calor, sequías e inundaciones (Hansen, 2007; IPCC, 2007; Martens et al., 2010). El hecho de que el crudo convencional pueda haber alcanzado su pico no está aliviando el problema del clima (García, 2009; Bardi, 2009), ya que puede hacer que la industria extraiga los combustibles líquidos de fuentes “sucias”, como las arenas de alquitrán y carbón, lo que emite más CO₂ por cada unidad de energía producida.

Otro importante asunto global que está volviendo a captar la atención es el de la población. El control poblacional se había convertido en un asunto político incluso antes de LDC; como se evidencia en textos como el de Hardin, titulado *The Tragedy of Commons* (1968) o libros como el de Ehrlich, *The Population Bomb* (1968). Sin embargo, el destino de las políticas de control de población siguió la misma parábola de LDC. Es decir, después de una fase de gran interés, el concepto fue demonizado y desapareció del horizonte político, al menos en los países occidentales. Algunos autores (Rey y Elliot, 1997) afirmaron que un fenómeno llamado Hardinian Taboo había frenado a la gente a expresar sus puntos de vista sobre la sobrepoblación, por temor a provocar controversia.

En cualquier caso, la cuestión de la población nunca desapareció completamente del horizonte político y se mantuvo activa en aquellos países donde la transición demográfica tardó en llegar; como, por ejemplo, China, donde “la política del hijo único”, iniciada en 1979, ha sido un éxito en la reducción del crecimiento poblacional (Feeney y Feng, 1993).

Hoy en día, parece haber signos de que el debate poblacional se está retomando, con temores contrapuestos: la sobrepoblación (por ejemplo, Butler, 2004) y el colapso de la población (Pearce, 2010; Connelly, 2008). Paul y Anne Ehrlich (2009) también han reexaminado *The Population Bomb* (Ehrlich y Ehrlich, 1968) más de 40 años después de su publicación. Señalan que el libro tiene varios defectos, siendo el principal el haber subestimado el efecto de la “revolución verde” en la agricultura. Sin embargo, según los autores, el tema principal del libro, el de la capacidad limitada del ecosistema para producir alimentos, sigue siendo válida.

Es posible que el mundo entero esté pasando por una transición demográfica del mismo tipo que la experimentada por los países ricos, tal como indican los resultados del último estudio LDC (Meadows et al., 2004).

En otras palabras, puede que el crecimiento demográfico no esté manteniendo el ritmo exponencial que era tan preocupante en los cincuenta y sesenta, y podría estabilizarse o comenzar descender por sí mismo, sin necesidad de medidas de control activas. Sin embargo, por el momento, el crecimiento continúa y no parece seguro que la producción de alimentos pueda mantener la demanda mundial, especialmente en vista de las crecientes preocupaciones sobre el suministro de agua para riego (Hanjra y Qureshi, 2010).

A partir de estas consideraciones, se ve cómo el tema de los recursos, el clima y la población han reavivado el interés por los problemas del destino final de nuestra civilización. El colapso de las civilizaciones antiguas es un hecho bien conocido (por ejemplo, Tainter, 1988) y algunos libros de éxito, como *Collapse*, de Jared Diamond (2005), devolvieron el problema a la atención pública. Eso llevó a reexaminar los informes de LDC, que comenzaron a dejar de considerarse como “Chicken Little con un ordenador” (Meadows, 1999a). Esta vuelta al foco de interés ha tenido como resultado varios estudios que analizan el libro de LDC de 1972.

Ya en 1995, el economista Raymond Mikesell escribió una crítica positiva a LDC. Pero el verdadero cambio se inició en el

año 2000, con el estudio de Matthew Simmons titulado *Revisiting The Limits to Growth: Could The Club of Rome Have Been Correct, After All?*. Simmons (1943-2010) fue un banquero de inversión y un experto en petróleo, que aparecía con frecuencia en los medios de comunicación. Su estudio sobre LDC no es su obra más conocida pero, sin duda, la popularidad del autor la hizo muy visible. Simmons era alguien que normalmente pensaba “fuera de lo habitual”. Su documento, lleno de ideas interesantes, está escrito en un estilo fácil de leer, por ejemplo:

Para un libro que se publicó hace casi 30 años, es increíble que cualquiera recuerde su contenido. En ocasiones, me he visto entretenido con la pasión que aún provoca el trabajo del Club de Roma. Como he oído que este estudio ha sido completamente desacreditado, me he preguntado si la ira que este libro aún provoca es equivalente a enfadarse con el camarero cuando a la mañana siguiente el dolor de cabeza es cruel.

El artículo de Simmons fue el primero de una serie de análisis positivos sobre LDC publicados durante la primera década del siglo XXI. En 2004, Toby Gardner escribió un artículo para *Resources policy*, donde criticaba duramente algunos estudios precipitados, como los de Bjorn Lombord o Julian Simon. En 2008, el economista Peter A. Victor publicó su libro: *Managing without growth: slower by design, not disaster*, en parte basado en los escenarios de dinámica de sistemas inspirados por LDC.

Tanto Bardi (2008a) como Hall y Day (2009) observaron la relación entre los modelos de LDC y aquellos relativos al “pico del petróleo”. Bardi también revisó la historia de la demonización del estudio LDC (Bardi, 2008b). Un artículo reciente de Nørgård et al. (2010) también ha revisado favorablemente la historia de LDC, y otro de Eastin et al. (2010) establece la conexión entre el viejo debate sobre el

estudio de LDC y el actual debate sobre el cambio climático. El artículo de Eastin et al. contiene varias imprecisiones con respecto a la historia de LDC y parece dar crédito a la existencia de presuntos “errores” en el libro de 1972. Sin embargo, resulta fundamental la descripción de los problemas políticos que rodean ambos casos; destacando los enormes desafíos que implica mitigar tanto el agotamiento de los recursos como el cambio climático. Otro intento de vincular el cambio climático con el agotamiento de los recursos según se modelizó en LDC fue el realizado por Dolores García en 2009, quien utilizó el modelo World3 para calcular cómo el pico y el declive de los combustibles fósiles podrían afectar a la emisión de gases de efecto invernadero.

Otros avances importantes en este proceso de reevaluación de LDC fueron los trabajos de Hall y Day (2009) y Graham Turner (2008), que analizan en detalle cómo los diferentes escenarios presentados por LDC se podían comparar con la realidad histórica de los 30 años transcurridos desde la publicación del libro. El resultado, que sorprenderá a muchos, es que el escenario del “caso base”, no solo es el que mejor ha ido, sino también el que mejor ha descrito, con razonable aproximación, la evolución del sistema mundial hasta ahora. Según Turner, el crecimiento demográfico siguió una evolución muy próxima a la calculada y los datos históricos de la producción agrícola en términos de alimentos per cápita eran muy parecidos a los presentados en el escenario base, con un factor de aproximadamente 5 por ciento. Los datos históricos para la producción industrial también resultaron muy similares a los presentados en el escenario del caso base, con una diferencia de menos del 15 por ciento. Finalmente, Turner examinó los límites superior e inferior de las estimaciones disponibles sobre recursos minerales. Descubrió que el límite inferior volvía a coincidir con el escenario del caso base, mientras que el límite superior se correspondía con los escenarios más optimistas de LDC, donde se otorga a la tecnología un papel importante en el proceso de extracción.

En conjunto, estos resultados son excelentes teniendo en cuenta el intervalo de tiempo en cuestión. El cumplimiento del

escenario del caso base de LDC es todavía más sorprendente si se tiene en cuenta que fue uno de los primeros intentos en aplicar la dinámica de sistemas para modelizar la economía mundial y que se basaba en una serie de hipótesis que, en ese momento, no eran fácilmente verificables. En cualquiera de los casos, aun así, conviene recordar que LDC no pretendía ser una herramienta de predicción. El escenario del caso base y la realidad pueden divergir en un futuro, pero eso no mermaría la validez del estudio y de sus métodos.

Por lo tanto, el enfoque de LDC sobre la modelización del mundo no era incorrecto, a pesar de las leyendas surgidas a finales de los ochenta y que perduran hoy en día. De hecho, estamos descubriendo que tenemos excelentes métodos para contarnos algo sobre el futuro. Cuando se parte de principios físicos sólidos, buenos datos y un enfoque científico, se pueden hacer buenos modelos y obtener de ellos consejos útiles.

Hay varios ejemplos de buenas predicciones en el pasado. Por ejemplo, en 1956, Marion King Hubbert predijo acertadamente la tendencia de la producción de crudo en los 48 estados continentales de EE UU. Respecto a la ciencia climatológica, a partir del trabajo de Tyndall (1863), en 1970 Laudadio predijo correctamente la concentración de dióxido de carbono para finales de siglo (Laudadio, 1970). Más tarde, Wallace Broecker (1975) acertó al decir que “a principios del próximo siglo, el dióxido de carbono habrá elevado la temperatura media del planeta más allá de los límites experimentados en los últimos 1.000 años”.

No es que en el pasado no haya habido predicciones erróneas o advertencias desencaminadas. Por supuesto que las hubo, pero, en conjunto, al examinar la literatura científica, se comprueba que estas predicciones erróneas son menos frecuentes de lo que parece por la percepción general, como se puede observar con el caso del crudo (Bentley, 2000). También se puede comprobar que las proyecciones de la futura producción de materias primas minerales son normalmente más optimistas que pesimistas (Sohn, 2005). En otras palabras, es solo otra falsa leyenda la de que los científicos son

propensos a caer en el “síndrome de Chicken Little”, que consiste en creerse, basándose en pocos datos, que algunos recursos importantes, como los minerales y los alimentos, se agotarán pronto.

Así, fuimos advertidos hace décadas de los problemas a los que nos enfrentamos hoy en día. Si hubiéramos escuchado, habríamos tenido tiempo hace 30 años para prepararnos para el agotamiento de los recursos y el cambio climático. En cualquier caso, las advertencias fueron ignoradas y los mensajeros demonizados sobre la base de malas interpretaciones y leyendas sobre “predicciones erróneas”.

Una de las consecuencias sufridas por el eclipse de LDC en los noventa fue la de frenar el desarrollo de estudios sobre la modelización del mundo que incluyeran la economía y el ecosistema como factores endógenos. Desde luego, casi todo investigador dedicado a analizar estos temas se encontró con la imposibilidad de conseguir financiación pública para apoyar su trabajo. Hoy en día, un examen del ámbito de estudio (Fiddaman, 2010a, b) muestra que muchos modelos de estos se han desarrollado o se están desarrollando. Sin embargo, este ámbito no parece haber alcanzado el nivel de actividad esperado para un tema tan importante. La modelización del clima (IPSS, 2007) parece haber alcanzado un nivel mucho más sofisticado y de tener un apoyo económico mayor. Sin embargo, la situación puede cambiar.

Se ha anunciado recientemente (Technology Review, 2010; Fiddaman, 2010a, b) la puesta en marcha de un ambicioso plan europeo para la construcción de un modelo que simulará todo el planeta (incluyendo tanto el ecosistema como el sistema socioeconómico) en una escala y con una complejidad que nunca antes se había logrado. Consiste en la actualización de un sistema anterior denominado Earth Simulator, un sistema informático muy rápido diseñado principalmente para el estudio del clima. Hasta el momento es solo un anuncio, pero demuestra el renovado interés en la modelización del mundo del tipo del que LDC fue pionero.

Así, actualmente hay un resurgimiento de los modelos

mundiales que pueden devolver la modelización del mundo al centro del debate sobre el futuro de la sociedad. Todavía está por verse si esto nos permitirá resolver los retos a los que nos enfrentamos, pero al menos nos brindará una oportunidad.

CAPÍTULO 12

CONCLUSIÓN: LOS DESAFÍOS FUTUROS

El grupo de intelectuales que creó el Club de Roma en 1968 tenía metas ambiciosas. Patrocinaron el estudio de Los límites del crecimiento con la idea de que les ayudaría a entender lo que llamaron la “problemática mundial” o “el dilema de la humanidad”: un conjunto de problemas cruciales relacionados con el uso y la distribución de los recursos mundiales. Probablemente creyeron que, sobre la base de los resultados del estudio de LDC, habría sido posible convencer al público y a los líderes mundiales de que era necesario conducir cuidadosamente el sistema económico mundial hacia un estado estacionario y sostenible, proporcionando un nivel razonable de prosperidad material para todo el mundo. Pero esta idea resultó ser extremadamente difícil de poner en práctica.

El primer problema que se encontró fue la dificultad de que se comprendiera el mensaje. En la práctica, el estudio de LDC fue incorrectamente leído y malinterpretado; los escenarios se entendieron erróneamente como profecías del desastre; la necesidad de llevar a cabo acciones acordadas se vio como una llamada a la dictadura mundial, y el motivo de la igualdad se tomó como un intento de destruir la forma de vida de las personas de los países occidentales. Unido a esto, el concepto de que era necesario frenar las actividades contaminantes y ralentizar el crecimiento económico generó una fuerte oposición por parte de los poderosos grupos de presión industriales y políticos.

Este escollo no era claramente identificable en el momento del primer libro de LDC en 1972. El Club de Roma era consciente de las posibles reacciones negativas al estudio y lo había presentado a algunos revisores independientes antes su publicación. El sondeo reflejó una cierta perplejidad en relación con algunos temas, pero en su conjunto, nada que pudiera hacer prever la reacción que tuvo lugar posteriormente. Evidentemente, la amplia distribución del

estudio generó mecanismos de reacción que fueron imposibles de predecir en las pruebas a pequeña escala. En particular, en 1972, las campañas sesgadas destinadas a derribar los resultados científicos en aras de intereses especiales (Oreskes y Conway, 2010; McGarity y Wagner, 2008) eran todavía pocas y todavía no perfeccionadas. Pero, a finales de la década de 1980, estas técnicas eran bien conocidas y podían haber sido utilizadas en contra del estudio de LDC.

Bien fuera como resultado de una campaña mediática o bien como resultado de la tendencia humana a no creer en las malas noticias (el “efecto Casandra”), el estudio de LDC fue muy criticado, después ridiculizado y finalmente relegado al cubo de basura de las teorías científicas erróneas junto a la teoría de Lamarck sobre la evolución del cuello de las jirafas¹ y las afirmaciones de Aristóteles sobre la generación espontánea de larvas de gusanos en la suciedad. Las arraigadas creencias acerca de las “predicciones erróneas” de LDC siguen siendo generalizadas y son el mayor problema que se presenta siempre que se intenta reexaminar los resultados del estudio.

Las dificultades para comprender los problemas identificados por el estudio de LDC se ven agravadas por la dificultad para poner en práctica las acciones diseñadas para resolverlos. Los problemas globales precisan de acciones globales. El problema es que las acciones globales, no importa de qué tipo, no pueden ponerse en funcionamiento simplemente mediante exhortaciones y buena voluntad, sino que se necesitan mecanismos políticos e instituciones que funcionen.

Este es un obstáculo que no se identificó fácilmente cuando apareció el primer libro de LDC en 1972. El Club de Roma y los autores de LDC con frecuencia expusieron la necesidad de una acción acordada a nivel general para resolver —o por lo menos mitigar— los problemas mundiales, pero no parece que presentaran en momento alguno los mecanismos específicos oportunos para alcanzar los resultados deseados. En la práctica, el consenso general sobre esta cuestión parece haber sido —y todavía lo es— que las acciones globales diseñadas para luchar contra las amenazas medioambientales pueden

obtenerse a través de tratados internacionales. Pero, también, esta línea de acción se mostró difícil, en particular para los problemas más importantes, aquellos relacionados con la gestión global de los recursos.

Hoy en día existen varios casos de tratados internacionales diseñados para luchar contra las amenazas medioambientales que han tenido éxito. Un caso clásico, discutido ampliamente en la versión de LDC de 2004, es la prohibición de los clorofluorocarbonos (CFC), componentes que causan la disminución de la capa de ozono de la estratosfera que protege a los seres vivos de la radiación ultravioleta. El tratado contra los CFC, el Protocolo de Montreal, se firmó en 1987 y ha tenido éxito en la reducción del uso de los CFC y en el comienzo de una lenta vuelta a los niveles de ozono anteriores a los CFC. Se pueden considerar otros ejemplos, como el tratado de 1963, que prohibió las explosiones nucleares en la atmósfera; el tratado de Ottawa, de 1997, contra las minas antipersonal, y varios tratados que limitan la pesca excesiva.

Desgraciadamente, estos tratados tratan problemas específicos y relativamente sencillos. Actuar sobre problemas más complejos —y más peligrosos— resultó ser mucho más difícil. En relación con el calentamiento global, por ejemplo, se aprecia que las instituciones mundiales se mueven muy despacio —si es que se mueven algo— en lo que se refiere a tratar con este problema, que es potencialmente el más peligroso al que se ha enfrentado el ser humano. El Protocolo de Kioto, diseñado en 1997, constituyó un paso adelante, pero no tuvo éxito en la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera procedentes de las actividades industriales. Después, el fracaso de la reunión de Copenhague de 2009 fue un gran escollo para el intento de controlar el calentamiento global. Hoy, parece extremadamente difícil que sea posible un acuerdo para un nuevo tratado que mejore el de Kioto.

No parece que seamos capaces de hacerlo mejor en otras áreas medioambientales críticas. Es posible que haya países que estén limitando la explotación de los recursos minerales locales con el fin de extender su duración (Reynolds, 2000),

pero a escala global, el único tratado propuesto en este sentido ha sido el Protocolo del Petróleo propuesto por Colin Campbell en 1996 (en ese momento se conoció como el Protocolo Rimini) (Heinberg, 2006). Sin embargo, tras un interés inicial, la propuesta se ignoró.

El problema parece residir en cuestiones que requieren cambios generalizados en el comportamiento de todo el mundo. Prohibir los CFC resultó relativamente fácil: los sustitutos estaban a mano y la mayoría de la gente no se dio cuenta de que su nevera nueva estaba usando un líquido diferente del anterior. Pero cuando se trata de cosas como un “impuesto sobre el carbono” diseñado para luchar contra el calentamiento global o para frenar el agotamiento del petróleo, todo el mundo se da cuenta de que algunos bienes, desde los combustibles de automoción hasta la calefacción del hogar, suben de precio. Al mismo tiempo, las empresas que comercian con estos productos ven cómo sus ventas y, por lo tanto, sus beneficios, se reducen. Al final, se hace muy difícil para los políticos proponer y aplicar medidas que reduzcan su popularidad y dañen algunos sectores de la economía, a pesar de los beneficios para la sociedad en su conjunto. Prins et al. (2010) define el calentamiento global como un problema “perverso”, una definición que puede aplicarse igualmente al agotamiento de los recursos. Resolver este tipo de problemas implica cambios radicales en la estructura de la sociedad, lo que supone que sean políticamente imposibles de resolver y, en algunos casos, inmencionables.

Si se quieren poner en marcha medidas impopulares y a las que se resisten determinados grupos de presión, se debe alcanzar un nivel de visión compartida que aclare qué medidas como esas son absolutamente necesarias. No se trata de algo imposible: en situaciones de emergencia como guerras o desastres naturales, las personas comprenden la necesidad de hacer sacrificios personales en aras del bien común. Dada esta situación, habrá que esperar a que ocurra algún tipo de catástrofe que despierte la conciencia pública (véase, por ejemplo, Baranzini et al., 2003). Pero si se ha de esperar al colapso social previsto por los escenarios de LDC para que sea

absolutamente evidente, será demasiado tarde para hacer algo que lo prevenga en términos de tratados internacionales.

Pero si no se pueden poner en marcha acciones globales de gran envergadura, se puede, por lo menos, hacerlo lo mejor que podamos para mitigar los efectos negativos de los problemas que el estudio de LDC había identificado ya en 1972: agotamiento de recursos, contaminación persistente y erosión del suelo; todos ellos síntomas del estado de extralimitación en el que la sociedad se encuentra.

Considerando que lo perfecto es enemigo de lo bueno, se puede considerar una política de pequeños pasos, que sería mejor que nada y que contaría con la ventaja de ser viable. En este contexto, “pequeños pasos” significa impulsar medidas que sean flexibles y que se puedan adaptar progresivamente a los cambios en la magnitud de los problemas y en la comprensión pública de la situación. Por ejemplo, un impuesto sobre el carbono solo puede ser tan elevado como sea políticamente aceptable (Prinse et al., 2010) y dicho nivel puede que no sea lo suficientemente alto como para pagar por las llamadas “externalidades” o “costes externos” relacionados con las emisiones de CO₂. Pero incluso un pequeño impuesto sobre el carbono puede ser mejor que ningún impuesto en absoluto.

Entonces, es necesario asegurarse de que los pequeños pasos que se pueden tomar son consistentes con los objetivos deseados. Es perfectamente posible comprender cuáles son los problemas y aun así tomar decisiones que produzcan el efecto contrario al deseado (Meadows, 1999b). Con el fin de dar pasos en la dirección correcta, hay que saber hacia dónde se va y que esta información solo se puede obtener a través de los modelos.

Muchas personas parecen ver modelos —de todo tipo— como entidades llenas de ruido y de furia y que no significan nada, poco más que el rocío de los poemas de Basho o el Vanitas Vanitatum de Eclesiastés. ¿Qué podemos aprender sobre el mundo real, tan increíblemente complejo y variado, a partir de las ecuaciones codificadas en la memoria de un ordenador?

Sin embargo, todos (o casi todos) los modelos pueden ser útiles

si uno entiende sus límites y sus propósitos. Los modelos son los intentos de construir algo que refleja la forma en que se ve el mundo de acuerdo con los datos que se tienen. Este punto ha sido claramente expuesto por los autores de la tercera edición de LDC como (p. 133):

Para que este modelo sea de alguna utilidad, tendremos que compararlo con el “mundo real”, pero ni nosotros ni vosotros, nuestros lectores, han acordado un “mundo real” con el que compararlo. Todos nosotros tenemos nuestros propios modelos mentales de la entidad que normalmente se conoce como el mundo real. Los modelos mentales del mundo que nos rodea son informados por la evidencia objetiva y la experiencia subjetiva [...] Lo que entendemos por “mundo real” o “realidad” es justamente el modelo mental compartido de los autores de este libro. La palabra realidad nunca puede significar nada más que el modelo mental del usuario de esa palabra.

La discrepancia entre nuestros modelos mentales y el mundo real puede ser un importante problema de nuestro tiempo, sobre todo en vista de la dificultad de recopilar, analizar y dar sentido a la increíble cantidad de datos a la que hoy en día se tiene acceso. Desafortunadamente, la mayoría de la gente — incluyendo los responsables políticos— parece confiar más en fragmentos de noticias que ven en la televisión o que leen en la prensa que en los resultados de los esfuerzos de modelización, costosos y largos.

Al final, un modelo es una herramienta para la toma de decisiones y cualquier decisión tomada es el resultado de un proceso de razonamiento que se lleva a cabo dentro de los límites de la mente humana. Por lo tanto, los modelos, finalmente, han de ser entendidos de tal manera que al menos alguna capa del proceso de simulación sea comprensible por la mente humana. De lo contrario, puede hacer que nos encontremos a nosotros mismos actuando sobre la base de

modelos que no entendemos o sobre ningún modelo en absoluto. Seymour Papert en *Mindstorms* (Tormentas de mentes) (1980) había entendido bien la situación cuando habló de “los modelos intelectuales”.

Ningún modelo puede cambiar las creencias que están profundamente arraigadas en la mente humana. Sin embargo, hay alguna esperanza de que “los modelos intelectuales” puedan ayudar a las personas a superar sus prejuicios, al menos en parte. Para este propósito, los modelos cuantitativos mundiales pueden no ser una necesidad absoluta. Formas dinámicas de pensamiento basadas en conceptos tales como “puntos de palanca” (Meadows, 1999b) e “interpretaciones erróneas de la dinámica de sistemas” (Moxnes, 2000 y 2004; Moxnes y Saysel, 2009) pueden ayudar a evitar la trampa de la extralimitación. El uso de conceptos dinámicos puede ayudar a la gestión de la vida cotidiana en los negocios (Stermann, 2000) y en cuestiones sociales (Madden, 1979). El concepto de “quinta disciplina”, la gestión basada en los conceptos dinámicos, ha sido descrito por Peter Senge (Senge, 1990; Senge y Stermann, 1992).

Un modelo puede ampliar el poder mental de uno mismo, proporcionando métodos para definir y probar cuáles son las variables que mueven el mundo. En otras palabras, un buen modelo puede superar a los modelos mediocres sobre los que parece que se toman la mayoría de las decisiones —a todos los niveles— actuales en el mundo. Esta es, quizá, la mayor esperanza que tenemos para atender a los enormes desafíos a los que nos enfrentamos. Esta fue, y sigue siendo, la promesa de LDC que comenzó en 1972, en un viaje intelectual que perdura hasta la fecha.

Notas

1. Realmente, Lamarck nunca mencionó el cuello de las jirafas en los términos que normalmente se le atribuyeron (Ghiselin, 1994). Se

trata de otra falsa leyenda sobre una teoría científica.

EPÍLOGO

¿Tiene sentido seguir evocando transiciones hacia sociedades industriales sustentables?

1

En marzo de 1972 se publicó el primero de los informes al Club de Roma, *Los límites del crecimiento*¹. Esta obra pionera en la modelización de la economía mundial, en su interacción con la biosfera, se basaba en un complejo modelo matemático (World3) desarrollado inicialmente por el profesor norteamericano Jay W. Forrester, experto en dinámica de sistemas del Massachusetts Institute of Technology (MIT).

La tupida red de interacciones entre las cinco variables consideradas en el modelo —inversiones (industrialización), población, contaminación, recursos naturales y alimentos— sobrepasa las posibilidades de la intuición humana, y probablemente el logro mayor del informe *Los límites del crecimiento* (LDC) es haber construido por primera vez un modelo dinámico global que refleja de forma bastante adecuada la complejidad de estas interacciones, y los riesgos asociados con los crecimientos exponenciales de algunas magnitudes clave.

Una cosa debería haber quedado ya por entonces muy clara: el objetivo del modelo global World3 no era proporcionar predicciones exactas, sino tratar de anticipar la forma de comportamiento del sistema económico-ecológico mundial. No se trataba de hacer vaticinios, sino de construir una herramienta heurística útil. Para estudiar tal dinámica, se efectuaban siete simulaciones sucesivas que respondían a diferentes conjuntos de hipótesis. La conclusión general de LDC, como se sabe, era que la economía mundial tenderá a detener su crecimiento, y luego colapsar, como resultado de la combinación de una menor disponibilidad de recursos

naturales con sobrepoblación y exceso de contaminación. Y esta conclusión era “robusta” en la medida en que el desenlace variaba poco cuando cambiaban los supuestos iniciales de las simulaciones. Luego, esta obra pionera fue revisada, mejorada y actualizada en dos ocasiones: 1992 y 20042.

2

“El modo básico de comportamiento del sistema mundial consiste en crecimiento exponencial de la población y del capital, seguido de un colapso”, decían los autores y autoras de LDC en 1972. Está claro que no eran buenas noticias. El profesor Ugo Bardi —quien enseña Química Física en la Universidad de Florencia, y preside la sección italiana de ASPO, la Asociación para el Estudio del Cenit del Petróleo—, en el libro que acaban ustedes de leer, realiza la valiosa tarea de reconstruir la historia de LDC y los debates a que dio lugar. Bardi llama el “efecto Casandra” a la tendencia — probablemente innata— a creer lo que deseamos creer, y negar aquello que nos resulta incómodo... Especialmente en lo referente a problemas por venir que pueden tornarse dramáticos si no cambiamos cursos de acción muy arraigados. Y nos recuerda que, sin embargo, y pese a nuestra renuencia a prestar atención a los portadores de malas noticias, ¡Casandra tenía razón! La cuestión que en 1972 se puso sobre la mesa es que no resulta posible el crecimiento ilimitado dentro de una biosfera finita. Esta cuestión no ha dejado de acompañarnos ni ha perdido actualidad desde entonces: pero mientras los problemas se agravaban, los detractores de Casandra no han dejado de gritar cada vez más fuerte.

En la Era de la Denegación que comenzó hacia 1980 (donde ganó terreno constantemente un “negacionismo” que no solo rechaza el calentamiento climático, sino más en general todo lo referido a límites biofísicos con que pudieran topar las economías capitalistas), referirse a LDC se convirtió en algo

políticamente incorrecto, sobre todo en el mundo anglosajón... Salvo si se trataba de desacreditar esta importantísima obra. El adjetivo “maltusiano” bastaba para cerrar la boca a quien hubiera osado levantar la mano para preguntar. Solo en años recientes se ha invertido esta tendencia, con trabajos como los de G. M. Turner³ y Charles A. Hall junto con John W. Day⁴. El libro del profesor Bardi ahora publicado en español constituye un hito en esta recuperación.

Una cuidadosa revisión del intenso debate que siguió a la publicación de LDC en 1972 —y que involucró a especialistas de varias disciplinas, pero que en esencia enfrentó a economistas neoclásicos como William Nordhaus con los científicos que modelizaban usando dinámica de sistemas— lleva al profesor Bardi a la conclusión de que los críticos de aquel primer informe al Club de Roma no consiguieron entender bien a qué preguntas estaba intentando responder el estudio. Un debate incompleto, y pronto sesgado políticamente, nos explica Bardi que en realidad “nunca afrontó las cuestiones que estaban planteadas desde el principio. En la mayoría de los casos, las críticas se basaban en una lectura parcial y apresurada del estudio, mientras que algunas de las refutaciones mejor conocidas de LDC, particularmente las de William Nordhaus en 1973 y 1992, se apoyaban en una comprensión incompleta de lo que la dinámica de sistemas es y lo que trata de hacer”. Por cierto que una de las virtudes del libro de Bardi es la muy pedagógica manera en que va introduciendo los conceptos básicos del pensamiento sistémico y la system dynamics.

En 2012 se publicó otro informe al Club de Roma que ha pasado asombrosamente inadvertido: 2054 de Jorgen Randers⁵. Randers, investigador noruego miembro del equipo original que redactó LDC en 1972, ha ofrecido su predicción —

en este caso, sí, una predicción— sobre lo que es más probable que ocurra en el siglo XXI, a partir de todo su trabajo anterior en dinámica de sistemas y de las aportaciones especializadas de cuarenta expertos en diversos ámbitos de las ciencias naturales y sociales.

Su pronóstico se parece sobre todo al escenario dos de LDC: crisis de contaminación, con el dióxido de carbono como el principal contaminante persistente a largo plazo. Randers no prevé una suerte de apocalipsis global, sino más bien una lamentable cuesta abajo donde crecen colapsos parciales, graves conflictos y bolsas de miseria mientras que el BAU (business as usual) trata de seguir su huida hacia delante. Los recursos de todo tipo van agotándose, y hay que invertir cada vez más simplemente para mantener el funcionamiento habitual de sistemas cada vez más disfuncionales. Eso sí, las cosas se pondrían mucho peores en la segunda mitad del siglo XXI⁶.

4

Hoy, dice Ugo Bardi, “nos enfrentamos a una contradicción fundamental entre el deseo humano de tener más, probablemente conectado con la forma en que están contruidos nuestros cerebros, y el hecho de que los recursos del mundo son limitados; una consecuencia de la forma en que está construido el universo. El ‘dilema de la humanidad’, tal y como la definió el Club de Roma en su fundación (1970), sigue siendo un problema irresuelto. Lo único que podemos decir con certeza es que no hay tecnologías mágicas que nos puedan sacar fuera del callejón sin salida. La única vía es aprender a vivir dentro de los límites”. Ojalá que esta sensata advertencia de Bardi/Cassandra encontrase un eco suficiente, sin que nos veamos obligados a intentar “aprender a fuerza de catástrofes” cuando ya apenas nos queda margen para evitar lo peor...

Por otra parte, uno no deja de asombrarse ante el punto ciego

que aparece una y otra vez en tantos bienintencionados discursos científicos: ¿de verdad se cree que nuestro problema de fondo lo puede diagnosticar una psicología de la insaciabilidad humana? Parece que hay —como dicen los anglosajones— un gran elefante dentro de la habitación, como casi siempre cuando debatimos sobre crisis ecológico-social: el elefante llamado capitalismo... ¿De verdad se cree que podemos hablar de límites del crecimiento sin hablar de capitalismo?

7

5

El enorme interrogante que se nos plantea apenas cerramos las páginas de este libro de Ugo Bardi dice más o menos: ese vital objetivo por el que ha luchado el grueso del movimiento ecologista durante medio siglo, una sociedad industrial sustentable, ¿aún puede lograrse?⁸ Aquí resulta importante distinguir entre factibilidad o realizabilidad en términos puramente técnicos, y en términos sociopolíticos.

Un importante trabajo reciente de Antonio García-Olivares y colaboradores (investigador del CSIC, científico especializado en simulación matemática y dinámica de sistemas) muestra que se puede concebir un mix mundial de fuentes renovables que utilice tecnologías ya probadas y materiales comunes (sorteando los fuertes factores limitantes que encontramos en el plano técnico-material, tales como las reservas mundiales de litio, níquel o neodimio), capaz de generar la energía suficiente para una sociedad industrial sustentable. Pero ello solo sería posible con una ingente reorientación del esfuerzo inversor (digámoslo claramente: un esfuerzo incompatible con la organización de las prioridades privadas de inversión bajo el capitalismo), y se llegaría a una situación de generación estacionaria de energía (básicamente electricidad), situación

incompatible con la continuación del crecimiento socioeconómico exponencial de los últimos decenios⁹.

Así, en cuanto a esa base de la economía mundial que son sus sistemas energéticos, la respuesta sería: sobre el papel, el cambio es aún técnicamente posible —quizá no durante mucho tiempo—. Pero ¿lo es políticamente? ¿Resulta verosímil una acumulación de fuerzas a escala mundial que desemboque en cambios revolucionarios a corto plazo —y cambios además de signo ecosocialista—, cuando sabemos que esa corriente sociopolítica tiene un peso muy pequeño dentro del no muy boyante campo de las fuerzas anticapitalistas? El propio Ugo Bardi, en un breve artículo, a partir de una consideración termodinámica de la economía (como la que han desarrollado Arto Annala y Stanley Salthe)¹⁰, concluye:

No podemos ir contra la termodinámica, pero podríamos al menos evitar alguno de los efectos más desagradables que se originan por intentar superar los límites de los recursos naturales. Este punto ya fue examinado en 1972 por los autores del primer informe Límites al crecimiento sobre la base de sus modelos [fundamentados en la dinámica de sistemas] pero, a la postre, es solo una cuestión de sentido común. Para evitar, o al menos mitigar el colapso, debemos parar de crecer. De esta forma, los recursos no renovables durarán más y podremos utilizarlos para desarrollar y usar recursos renovables. El problema es que frenar el crecimiento no proporciona beneficios y que, en la actualidad, las renovables no proporcionan todavía beneficios tan grandes como los de los combustibles fósiles que aún quedan. Por tanto, al sistema no le gusta ir en esa dirección —tiende, más bien, a ir hacia los beneficios más altos a corto plazo, con el sistema financiero facilitando el camino—. El sistema tiende a seguir usando recursos no renovables [y también renovables, claro], incluso a costa de destruirse a sí mismo. Forzar al sistema a cambiar de dirección solo se podría conseguir mediante algún tipo de control centralizado... Pero eso, obviamente, es complejo, caro e impopular.¹¹

De forma más general, adaptar la economía mundial a los límites biofísicos del planeta (asunto ineludible si la especie humana desea tener un futuro más allá de las crisis del siglo XXI, el Siglo de la Gran Prueba¹²) exige una regulación global de esa economía... a la que los poderes capitalistas de este mundo se oponen ferozmente. Por ejemplo, reducir las emisiones de dióxido de carbono en las magnitudes y plazos necesarios, no ya para estabilizar el clima del planeta, sino para frenar lo peor del calentamiento (reducir al menos un 5 por ciento anual durante casi cuatro decenios, de 2013 a 2050, de manera que en 2050 supusieran aproximadamente una décima parte de las emisiones de 2010-2011), no es compatible con mantener la rentabilidad que exigen los capitales privados en el sistema de producción capitalista. Climatólogos como Kevin Anderson, director adjunto del Centro Tyndall para la Investigación del Cambio Climático en Gran Bretaña, señalan que ya hemos perdido la oportunidad para realizar cambios graduales (la negrita es del propio Anderson):

Tal vez, durante la Cumbre sobre la Tierra de 1992, o incluso en el cambio de milenio, el nivel de los dos grados centígrados [con respecto a las temperaturas preindustriales] podrían haberse logrado a través de significativos cambios evolutivos en el marco de la hegemonía política y económica existentes. Pero el cambio climático es un asunto acumulativo. Ahora, en 2013, desde nuestras naciones altamente emisoras (post-) industriales nos enfrentamos a un panorama muy diferente. Nuestro constante y colectivo despilfarro de carbono ha desperdiciado toda oportunidad de un “cambio evolutivo” realista para alcanzar nuestro anterior (y más amplio) objetivo de los dos grados. Hoy, después de dos décadas de promesas y mentiras, lo que queda del objetivo de los dos grados exige un

cambio revolucionario de la hegemonía política y económica.

13

Pero ¿resulta verosímil que tengan lugar los enormes cambios de consciencia y esfuerzos de acción colectiva, de signo ecosocialista, en los reducidísimos plazos de que aún quizá dispongamos?

7

Escribía hace un tiempo el profesor Ramón Alcoberro (de la Universitat de Girona): “Uno de los peores errores de los ecologistas es su absurda ‘pedagogía de la catástrofe’. La historia demuestra que frente a las catástrofes lo que triunfa es el egoísmo más galopante, o en el peor de los casos la solución totalitaria de un Hitler o un Stalin”¹⁴. Uno cree advertir cierta confusión: es como si se atribuyera al ecologismo cierto regodeo en una estrategia de “cuanto peor mejor”, en contra de toda evidencia... Lejos de complacerse en las catástrofes, lo que el ecologismo ha hecho sin descanso —desde hace medio siglo— es tratar de prevenirlas. Lo que ha hecho es señalar hacia las rutas que nos llevan a un despeñadero y decir una y otra vez: por ahí no. Sus problemas son los que, desde hace muchos siglos, hemos categorizado como “síndrome de Casandra”. Quizá Casandra pueda aprender a “comunicar mejor” (es lo que se le recomienda muchas veces al ecologismo), pero desde luego no es ninguna “pedagoga de la catástrofe”. Ah, por cierto: al profesor Bardi lo encontrarán también en el estupendo blog “Cassandra’s Legacy”¹⁵.

8

Y ahora ¿qué? Medio siglo de luchas ecologistas se saldan con una derrota sin paliativos del movimiento. No fuimos capaces de impulsar el cambio político, económico y sociocultural por el que luchamos. Dennis Meadows, uno de los autores principales de LDC en 1972, se dirigió en Bucarest a los miembros del Club de Roma en octubre de 2012. En su alocución constataba¹⁶: estamos ya más allá de los límites (en situación de overshoot o extralimitación); el tipo de transiciones graduales y ordenadas que se hubieran podido emprender en los años setenta del siglo XX no resultan ya posibles en el siglo XXI; no tiene sentido seguir fantaseando con el mítico desacoplamiento o el no menos mítico desarrollo sostenible. Frente a la noción de sustainability (central para el ecologismo que la creó, aunque luego se viese espantosamente desvirtuada, a partir sobre todo de la Cumbre de Río, en 1992), recomienda Meadows, hablemos de resilience: tenemos que tratar de ganar resiliencia¹⁷ para los tiempos durísimos que vienen... Dicho de otra forma: abandonemos la ilusión de transiciones ordenadas y hagamos frente a la mucho más dura realidad de los colapsos que se avecinan.

En esta perspectiva desengañada —la que adoptaron hace ya años, entre nosotros, Ernest García, Antonio Estevan o Ramón Fernández Durán¹⁸— se están situando, en los primeros años del siglo XXI, sectores sociales minoritarios que de alguna forma adoptan una perspectiva postecologista. Se trata de segmentos de los movimientos decrecentistas¹⁹, de las “Iniciativas de Transición” en el Occidente euronorteamericano²⁰, de las ecoaldeas de los “neorrurales” en el sur de Europa²¹, o de la “nueva ruralidad comunitaria” que viene desarrollándose en América Latina²², asociada a menudo con el ideario indígena del “Buen Vivir”. También se gestan núcleos que trabajan en pos de un cambio cultural que enlazaría, por su radicalidad, con algunas de las líneas de trabajo de la Deep Ecology en los últimos tres decenios. Así, podríamos evocar a colectivos como Véspera de Nada (la Asociación por una Galicia Sin Petróleo)²³, el Instituto de Transición Rompe el Círculo (en Móstoles, Madrid)²⁴ o el

proyecto británico Dark Mountain²⁵.

9

Uno de los fundadores del Dark Mountain Project es Paul Kingsnorth, quien afirma de sí mismo:

Durante cincuenta años, fui un ecologista convencido y escritor especializado en el tema. Durante dos años, fui editor de la revista *The Ecologist*. Desde sus páginas, luché contra el cambio climático, contra la deforestación, contra la sobrepesca, la destrucción de los ecosistemas, la extinción de las especies, etc. Escribí sobre cómo el sistema económico global estaba afectando al sistema ecológico. Hice todo lo que hacen los ecologistas. Pero después de un tiempo, dejé de hacerlo.

Hay dos razones para haber llegado a ese punto. Una es que ninguna de las campañas ha tenido éxito, excepto a un nivel muy local. A nivel global, todo va a peor. La segunda razón es que los ecologistas, me parece a mí, no están siendo honestos consigo mismos. Cada día se hace más obvio que el cambio climático es imparable, que la sociedad actual no es coherente con las necesidades del planeta, y que el crecimiento económico forma parte del problema. Que el futuro no va a ser verde, confortable y sostenible para 10.000 millones de personas. Que va a ser lo contrario. Y todos los ecologistas hemos estado realizando nuestra labor propia, haciendo como que lo imposible va a ocurrir. Yo ya no me trago ese cuento, y creo que no soy el único.

26

Si el milagro (desde una perspectiva laica: lo extremadamente improbable) no va a tener lugar, se impone una reorientación.

Paul Kingsnorth y Dougald Hine redactaron un manifiesto notable, “Uncivilization”²⁷, y pusieron en marcha su Proyecto Montaña Oscura. Es una llamada, dicen, a aquellos que no creen que el futuro vaya a ser una prolongación del presente; una llamada a quienes quieran forjar una nueva y radical respuesta cultural frente a la tremenda situación a la que hacemos frente. Busca una visión realista sobre la verdadera posición de la humanidad en el mundo. Kingsnorth explica:

Podemos decirlo alto y claro: no vamos a salvar el planeta. El planeta no se está muriendo, es nuestra civilización la que lo hace, y ni la tecnología sostenible ni el comercio justo va a evitar que nos la peguemos.

Curiosamente, aceptar esta realidad no lleva a la desesperación, como algunos sugieren, sino a la esperanza. Una vez que dejamos de hacer como que lo imposible puede suceder, nos sentimos libres para pensar seriamente en el futuro. Esto es lo que el movimiento Dark Mountain va a hacer.

28

Jorge Riechmann

Madrid, 1 de diciembre de 2013

Notas

1. Donella H. Meadows; Dennis L. Meadows; Jorgen Randers; William B. Behrens III: *The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, Potomac, Londres, 1972. Enseguida se tradujo al español: FCE, Ciudad de México 1972.

2. Dennis L. Meadows et al.: *Más allá de los límites del crecimiento*,

EL PAÍS/Aguilar, Madrid, 1992; Donella H. Meadows, Jorgen Randers y Dennis L. Meadows: Los límites del crecimiento 30 años después, Galaxia Gutenberg/Círculo de Lectores, Barcelona, 2006.

3. G. M. Turner: "A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality", Global Environmental Change, vol. 18, 2008, pp. 397-411.

4. Charles A. Hall y John W. Day: "Revisiting The Limits of Growth after peak oil", Scientific American, vol. 97, 2009 (pp. 230 y ss.).

5. Jorgen Randers: 2054. A Global Forecast for the Next Forty Years, Chelsea Green Publishing, 2012. Otro libro importante en este sentido: Stephen Emmott, 10.000 millones, Anagrama, Barcelona, 2013.

6. La síntesis de este estudio científico sería:

- **La población mundial se estancará antes de lo esperado debido a que la fertilidad caerá drásticamente en una población cada vez más urbanizada (se pasará del 50 por ciento de población urbana en 2010, a un 70 por ciento hacia 2050). La población llegará a su máximo en 8.100 millones de personas poco después de 2040, para luego reducirse.**
- **El PIB mundial crecerá más lentamente de lo esperado, debido al menor crecimiento de la población y la disminución de las tasas de crecimiento de la productividad laboral. Hacia 2050 el PIB mundial alcanzará 2,2 veces los niveles de 2010.**
- **El crecimiento de la productividad será más lento que en el pasado porque las economías nacionales están madurando; debido también al aumento de los conflictos sociales; y debido a los crecientes impactos negativos de los fenómenos meteorológicos extremos.**
- **La tasa de crecimiento del consumo mundial se desacelerará, pues un porcentaje creciente del PIB tendrá que ser asignado a inversión con el fin de tratar de resolver los problemas creados por el cambio climático, la escasez de recursos y la pérdida de biodiversidad. El consumo mundial de bienes y servicios**

llegará a su máximo hacia 2045.

- **Los costes de reparación serán cada vez mayores. Como consecuencia del incremento de la inversión social en las próximas décadas (aunque será a menudo involuntaria y reactiva, como respuesta a las crisis agudizadas), los problemas de recursos naturales y la crisis climática no serán catastróficos antes de 2052. Pero habrá mucho sufrimiento innecesario, a causa del calentamiento climático, hacia mediados de siglo.**
- **Estamos emitiendo, a comienzos del siglo XXI, dos veces más dióxido de carbono del que puede ser absorbido por los sumideros del planeta (sus océanos y bosques). Las emisiones alcanzarán su máximo hacia 2030 y descenderán a partir de entonces; pero ello no bastará para ralentizar el calentamiento. El peligroso umbral de los dos grados centígrados por encima de las temperaturas preindustriales promedio se alcanzará ya hacia 2050 (con unas 500 ppm en la atmósfera por entonces).**
- **La falta de una respuesta humana específica y contundente en la primera mitad del siglo XXI va a situar al mundo en el peligrosísimo camino hacia un calentamiento global autorreforzado, descontrolado y desastroso en la segunda mitad del siglo XXI.**
- **El lento crecimiento en el consumo per cápita en gran parte del mundo (y el estancamiento de los países ricos) dará lugar a un aumento de las tensiones y los conflictos sociales, lo que reducirá aún más el crecimiento de la productividad.**
- **El cortoplacismo del capitalismo y la democracia representativa será responsable de que las decisiones prudentes necesarias para lograr el bienestar a largo plazo no se tomarán a tiempo.**
- **La población mundial será cada vez más urbana, y carecerá de la voluntad de proteger la naturaleza por su propio bien. La biodiversidad se verá gravemente afectada. El mundo natural desaparecerá, excepto en las áreas protegidas.**

- El impacto variará grandemente entre las cinco regiones analizadas en el libro: EE UU; las otras naciones de la OCDE (incluida la Unión Europea, Japón y Canadá, entre otros países industrializados); China; los llamados BRISE (Brasil, Rusia, India, África del Sur y diez otras grandes economías emergentes); y el resto del mundo (los 2.100 millones de personas en la parte inferior de la escala de ingresos).

- El perdedor quizá más sorprendente será la actual elite económica mundial, y particularmente EE UU (que experimentarán un estancamiento del consumo per cápita para las próximas generaciones). China será el principal ganador. Los BRISE progresarán. El resto del mundo seguirá siendo pobre, y de hecho habrá muchísima pobreza, tanto en el mundo “desarrollado” como en el “subdesarrollado”.

Todos —y en particular los pobres— vivirán en un mundo progresivamente más desordenado y con el clima dañado, con impactos cada vez más severos en la segunda mitad del siglo XXI. Las grandes migraciones —de gente que abandonará zonas inhabitables cada vez más amplias— darán lugar a conflictos armados. Pues “la respuesta humana llegará demasiado tarde. El factor más crítico serán las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas emisiones permanecerán tan altas que nuestros nietos, con altísima probabilidad, tendrán que vivir con un calentamiento global autorreforzado, y por eso descontrolado, en la segunda mitad del siglo XXI” (Jorgen Randers, “A short summary of the book 2054 – A Global Forecast for the Next Forty Years”, versión del 1 de marzo de 2012; puede consultarse en www.2052.info).

7. Mi respuesta es no, y he tratado de argumentarla en diversos lugares. Véase por ejemplo Jorge Riechmann: La habitación de Pascal, Los Libros de la Catarata, Madrid, 2009; y también El socialismo puede llegar solo en bicicleta, Los Libros de la Catarata, Madrid, 2012.

8. La chica de la limpieza en casa de unos amigos donde me hospedé una noche en el otoño de 2013, una mujer aragonesa de cultura muy elemental, me preguntó a bocajarro: “¿Tú crees que se puede salvar la Tierra o no?”. Es la misma pregunta que se hacen

incluso los think tanks repletos de conocimiento y sin embargo por lo general sesgados hacia el optimismo como el Worldwatch Institute de Washington: “¿Es aún posible lograr la sostenibilidad?” (Worldwatch Institute, ¿Es aún posible lograr la sostenibilidad? [informe La situación del mundo 2013], Icaria, Barcelona 2013).

9. Antonio García-Olivares, Joaquim Ballabrera-Poy, Emili García-Ladona y AntonioTuriel: “A global renewable mix with proven technologies and common materials”, *Energy Policy*, 41 (2012), pp. 561-574.

10. Arto Annala y Stanley Salthe: “Economies evolve by energy dispersal”, *Entropy*, vol. 11, pp. 606-633, 2009.

11. Ugo Bardi: “¿Por qué es el crecimiento económico tan popular?”, publicado en *Espai Marx* el 4 de diciembre de 2011. Puede consultarse en <http://www.espai-marx.net/es?id=6820>

12. Jorge Riechmann: *El siglo de la Gran Prueba, Baile del Sol, Tegueste (Tenerife)* 2013.

13. Citado en Naomi Klein, “Por qué necesitamos una eco-revolución”, sin permiso, 17 de noviembre de 2013. Puede consultarse en <http://www.sinpermiso.info/textos/index.php?id=6430>

14. Ramón Alcoverro, “Decrecimiento contra decadencia”, *Barcelona Metròpolis*, 75, verano de 2009.

15. <http://cassandralegacy.blogspot.com.es/>

16. Se puede encontrar el vídeo de la conferencia en <http://casdeiro.info/textos/index.php/2013/11/22/15-15-en-quince-anos-solo-nos-quedara-el-15-del-petroleo/>

17. Hay una dificultad aquí: la noción de resiliencia que usa Meadows, procedente de la ecología, ha cobrado otro sentido en la psicología popular y la literatura de autoayuda de los últimos decenios, donde se ha transformado en un ideograma central del discurso capitalista —especialmente en la fase neoliberal del capitalismo—. Para este, no hay problemas colectivos ni conflictos

sociales: solo carencias individuales. Y así “la resiliencia se define como la capacidad de soportar los golpes y los avatares de la vida y sobreponerse a las circunstancias”, desde la convicción de que “el que puede cambiar sus pensamientos, puede cambiar su destino”. Se trata de “olvidar el pasado, sobreponerse y mirar hacia delante” para triunfar en la lucha de todos contra todos que es el mercado capitalista (los entrecomillados proceden de Patricia Ramírez, “Cómo sobre ponerse a los golpes de la vida”, El País Semanal, 1 de diciembre de 2013).

18. Ramón Fdez. Durán, La quiebra del Capitalismo Global (2000-2030): preparándonos para el comienzo del colapso de la civilización industrial, Libros en Acción, Madrid, 2011.

19. Carlos Taibo, En defensa del decrecimiento, Los Libros de la Catarata, Madrid, 2009.

20. Joseba Azkarraga Etxagibel, Tod Sloan, Patricio Belloy y Aitzol Loyola, “Eco-localismos y resiliencia comunitaria frente a la crisis civilizatoria. Las Iniciativas de Transición”, Polis, 33, 2012. Puede consultarse en <http://polis.revues.org/8400>

21. La web de la Red Ibérica de Ecoaldeas es <http://rie.ecovillage.org/>

22. David Barkin, “Hacia un nuevo paradigma social”, Polis, 33, 2012. Puede consultarse en <http://polis.revues.org/8400>

23. <http://www.vesperadenada.org/>

24. <http://mostolessinpetroleo.blogspot.com.es/>

25. <http://dark-mountain.net/>

26. <http://news.soloclima.com/noticias/cambio-climatico/el-proyecto-de-la-montana-negra-mas-alla-del-ecologismo>. Se traducen fragmentos del artículo original aparecido en The Guardian: <http://www.theguardian.com/environment/2010/apr/29/environmentalism-dark-mountain-project>

27. Los ocho principios de la Uncivilization (“incivilización” o descivilización) rezan así (traducción de Jorge Riechmann):

- 1. Vivimos en un momento de desintegración social, económica y ecológica. En torno nuestro se acumulan las señales de que todo nuestro sistema de vida será historia pasada dentro de poco. Queremos afrontar esta realidad de forma honesta y aprender a convivir con ella.**
- 2. Rechazamos la creencia en que la crisis multidimensional de nuestro tiempo puede reducirse a una serie de “problemas” susceptibles de resolverse mediante soluciones políticas o tecnológicas.**
- 3. Creemos que las raíces de esta crisis se encuentran en las historias que nos hemos estado contando a nosotros mismos. Pretendemos poner en entredicho los mitos sobre los que se basa nuestra civilización: el mito del progreso, el mito de la centralidad humana, y el mito de nuestra separación respecto de la “naturaleza”. Estos mitos son tanto más peligrosos cuanto que hemos olvidado que se trata de mitos.**
- 4. Queremos reavivar el papel de la tradición oral y la narración como algo más que mero entretenimiento, pues es a través de las historias como tejemos la realidad y nos entretejemos en ella.**
- 5. Los seres humanos no son el fin último de este planeta. Nuestro arte comenzará con un intento de salir de la burbuja humana. Mediante nuestra cuidadosa atención, vamos a restablecer el diálogo con el mundo no humano.**
- 6. Celebraremos la escritura y el arte que arraigan en un lugar y se basan en un sentido del tiempo. Nuestra literatura ha estado dominada durante demasiado tiempo por los que habitan en las ciudadelas cosmopolitas.**
- 7. No vamos a extraviarnos creando teorías o ideologías. Nuestras palabras van a ser muy elementales, y escribiremos con tierra debajo de las uñas.**
- 8. El fin del mundo tal y como lo conocemos no es el fin del mundo. Juntos encontraremos la esperanza más allá de la esperanza, los caminos que nos conducirán hacia el mundo**

desconocido que se encuentra ante nosotros.

El texto completo del manifiesto puede consultarse en <http://dark-mountain.net/about/manifesto/>

28. Un espléndido ensayo de este autor es “Ecología oscura. Buscando certezas en un mundo postverde”, traducido por Sara Plaza y publicado en su blog Civallero & Plaza (compartido con Edgardo Civallero) el 21 de mayo de 2013. Puede consultarse en <http://civalleroypalaza.blogspot.com.es/2013/05/ecologia-oscura.html>. El texto original apareció en el número de enero/febrero de 2013 de la revista Orion, y puede consultarse en www.orionmagazine.org

BIBLIOGRAFÍA

Ackoff, R. L. (1971). "Towards a System of Systems", *Management Science*, vol. 17, nº 11, pp. 661-670.

Alasdair, R. S. (2005). "Spin Control and Freedom of Information: Lessons for the United Kingdom from Canada", *Public Administration* 83: 1. doi: 10.1111/j.0033-3298.2005.00435.x

Aleklett, K., Höök, M., Jakobsson, K., Lardelli, M., Snowden, S., Söderbergh, S. (2010). "The Peak of the Oil Age", *Energy Policy*, vol. 38, issue 3, pp. 1398-414.

Allen, R. G. D. (1955). "The Engineer's Approach to Economic Models", *Economica*, New Series, vol. 22, nº 86, pp. 158-168.

Ashford, Oliver, M. (1985). *Prophet or Professor? Life and Work of Lewis Fry Richardson*. Bristol: Adam Hilger. ISBN: 978-0852747742.

Atkinson, Nancy (2010). "New Dates for Final Shuttle Launches", *Universetoday*, <http://www.universetoday.com/67524/new-dates-for-final-shuttle-launches/> (consultado el 11 de septiembre de 2010).

Ayres, Robert, U. (1998). *Technological Progress: A Proposed Measure, Technological Forecasting and Social Change*, vol. 59, Issue 3, pp. 213-233.

Ayres, Robert, U. (2001). "The minimum complexity of endogenous growth models: the role of physical resource flows", *Energy*, 26, 9, 817-838.

Ayres, R. (2006). "Lecture 5: Economic growth (and Cheap Oil)". http://www.cge.uevora.pt/aspo2005/abscom/AS-PO2005_Ayres.pdf

Ayres, R. (2007). "On the practical limits to substitution", *Ecological Economics*, vol. 61, pp. 115-128.

Bailey, Ronald (1989). "Dr. Doom", *Forbes*, 16 de octubre, p. 45.

Bailey, Ronald (1993). *Eco-Scam: The False Prophets of Ecological Apocalypse*, St. Martins, Washington.

Bak, Per (1996). "How Nature Works", Copernicus, Nueva York.

Baker, C. S. y Clapham, P. J. (2004). *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 19, nº 7, p. 1.

Ball, Tim (2010). "Disastrous Computer Models Predictions From Limits to Growth to Global Warming", *Canadian Free Press*, <http://www.canadafreepress.com/index.php/article/22444> (consultado el 22 noviembre de 2010).

Baranzini, Andrea, Chesney, Marc, Morisset, Jacques (2003). "The impact of possible climate catastrophes on global warming policy", *Energy Policy*, 31, pp. 691-701.

Bardi, U. (2005). "The mineral economy: a model for the shape of oil production curves", *Energy Policy*, vol. 33, pp. 53-61.

Bardi, U. (2007a). "Peak Oil's ancestor: the peak of British Coal Production in the 1920s", *ASPO Newsletter* nº 73. http://www.energiekrise.de/e/aspo_news/aspo/newsletter073.pdf (consultado el 5 de septiembre de 2010).

Bardi, U. (2007b). "Energy Prices and Resource Depletion: Lessons from the Case of Whaling in the Nineteenth Century", *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 2, Issue 3, pp. 297-304.

Bardi, U. y Pagani, M. (2007). "Peak Minerals", *The Oil Drum*, <http://europe.theoil drum.com/node/3086> (consultado el 31 de agosto de 2010).

Bardi, U. (2008a). "Peak Oil and 'The Limits to Growth': two parallel stories", *The Oil Drum*, 16 de febrero, <http://www.theoil drum.com/node/3550> (consultado el 20 de julio de

2010).

Bardi, U. (2008b). "How 'The Limits to Growth' was demonized", The Oil Drum, 9 de marzo, [http:// www.theoil Drum.com/node/3551](http://www.theoil Drum.com/node/3551) (consultado el 20 de julio de 2010).

Bardi, U. (2008c). "The Universal Mining Machine", The Oil Drum, [www.theoil Drum.com/ node/3451](http://www.theoil Drum.com/node/3451) (consultado el 31 de agosto de 2010).

Bardi, U. (2009). "Fire or Ice? The role of peak fossil fuels in climate change scenarios", The Oil Drum, [http:// europe.theoil Drum.com/node/5084](http://europe.theoil Drum.com/node/5084) (consultado el 2 de febrero de 2011).

Bardi, Ugo, Lavacchi, Alessandro (2009). "A Simple Interpretation of Hubbert's Model of Resource Exploitation", *Energies* 2, nº 3: 646-661.

Bardi, U. (2010). "Extracting minerals from seawater. An energy analysis", *Sustainability* 2 (4): 980-992; doi: 10.3390/su2040980.

Barney, G. O. (1980). "The Global 2000 Report to the President of the US", Pergamon Policy Studies, Nueva York.

Beckerman, W. (1974). "Economists, Scientists and Environmental Catastrophe", *Oxford Economic Papers*, 24, p. 327.

Bentley, R. W. (2000). "Were those past oil forecasts really so wrong?", en *The industry newsletter: To-morrow's Oil. OneOffshore*, part of the PetroData Group, Aberdeen, noviembre.

Bihouix, Phlippe y De Guillebon, Benoit (2010). "Quel futur pour les métaux?", EDP Sciences, París.

Bongaarts, J. P. (1973). "A review of the population sector in *The Limits to Growth*", *Studies in Family Planning*, vol. 4, nº 12, pp. 327-334.

Boyd, R. (1972). "World dynamics: a note", *Science*, 177: 516-519.

Bradsher, K. (2010). "China Said to Widen Its Embargo of

Minerals”, New York Times, 19 de octubre, <http://www.nytimes.com/2010/10/20/business/global/20rare.html> (consultado el 1 de noviembre de 2010).

Broderick, D. (2001). “The Spike”, Tom Doherty Associates, Nueva York.

Broecker, W. S. (1975). “Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming?”, Science, New Series, vol. 189, nº 4201 (8 de agosto, 1975), pp. 460-463.

Brown, L. S., Castillejo, L., Jones, H. F., Kibble, T. W. B. y Rowan-Robinson, M. (1973). “Are there real limits to growth? A reply to Beckerman”, Oxford Economic Papers, new Series, vol. 25, nº 3, pp. 455-460.

Brown, M. T. (2004). “A picture is worth a thousand words: energy systems language and simulation”, Ecological Modelling, 178: 83-100.

Burdekin, R. (1979). “A dynamic spatial urban model: A generalization of Forrester’s urban dynamics model”, Urban Systems, vol. 4, Issue 2, 1979, pp. 93-120.

Busby, S. (2006). “Pure Charity”, <http://www.after-oil.co.uk/charity.htm> (consultado el 4 de septiembre de 2010).

Butler, Colin, D. (2004). “Human Carrying Capacity and Human Health”, PLoS Med, 1 (3): e55.

Caffrey, M. (2000). “Toward a History-Based Doctrine for Wargaming,” Aerospace Power Journal, Fall 2000, <http://www.airpower.maxwell.af.mil/airchronicles/cc/caffrey.html>

Campbell, Colin, J. y Laherrère, Jean, H. (1998). “The End of Cheap Oil”, Scientific American, March issue, pp. 78-83.

Carson, Rachel (1964). Silent Spring, Boston: Houghton Mifflin.

Catton William, R. (1982). “Overshoot”, University of Illinois press, Champaign. ISBN: 0-252-009826.

Club of Rome (1970). “The Predicament of Mankind”, [http://sunsite.utk.edu/FINS/loversofdemocracy/ Predicament.PTI.pdf](http://sunsite.utk.edu/FINS/loversofdemocracy/Predicament.PTI.pdf) (consultado el 25 de octubre de 2010).

Cole, H. S. D., Freeman, C., Jahoda, M., Pavitt, K. L. R. (1973). “Models of Doom”, Universe Books, Nueva York.

Connelly, Matthew (2008). “Fatal Misconception”, Harvard University Press, Cambridge.

Coyle, R. G. (1983). “The technical elements of the system dynamics approach”, *European Journal of Operational Research*, vol. 14, Issue 4, diciembre de 1983, pp. 359-370, ISSN: 0377-2217, doi: 10.1016/0377-2217(83)90 236-9.

Daly, Herman (1977). “Steady State Economics”, Island Press, Washington, ISBN: 155963071X.

Daly, Herman, E. (1997). “Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz”, *Ecological Economics*, vol. 22, pp. 261-266.

De Wit, M. (2005). “Valuing copper mined from ore deposits” *Ecological Economics*, vol. 55 pp. 437-443.

Deffeyes, K. S. (2001). “Hubbert’s Peak: The Impending World Oil Shortage”, Princeton: Princeton University Press.

Deffeyes, K. S. (2005). *Beyond Oil*. ISBN:13 978-0-8090-2956-3.

Diederer, A.M. (2010). “Managed Austerity and the Elements of Hope”, Eburon, Delft, ISBN: 9789059724 259.

Diehl, H. (1969). *Tobacco and Your Health*, Nueva York, McGrawHill.

Dyson, F. J. (1960). “Search for Artificial Stellar Sources of Infra-Red Radiation”, *Science* 131 (3414): 1667-1668.

Eastin, John, Grundmann, Reiner y Prakash, Aseem (2010). “The two limits debates: ‘Limits to Growth’ and climate change”, *Futures*, en prensa.

Ehrlich, Paul, R., y Ehrlich, A. (1968). "The Population Bomb", Nueva York, Sierra Club-Ballantine Books.

Ehrlich, Paul, R., y Ehrlich, A. (2009). "The Population Bomb Revisited", <http://www.populationmedia.org/wp-content/uploads/2009/07/Population-Bomb-Revisited-Paul-Ehrlich-20096.pdf>. (consultado el 6 de noviembre de 2010).

Ettinger, Robert (1974). Man into Superman (HTML), Avon. ISBN: 0-380-00047-4.

Feeney, G., y Feng, W. (1993). "Parity progression and birth intervals in China: The influence of previous policy in hastening fertility decline", *Population and Development Review*, 19, 1, pp. 61-101.

Fiddaman, T. (2010a). "System Dynamics World Library", <http://www.metasd.com/models/> (consultado el 6 de noviembre de 2010).

Fiddaman, T. (2010b). "The model that ate Europe", <http://blog.metasd.com/2010/05/the-modelthat-ate-europe/> (consultado el 7 de noviembre de 2010).

Fischer, D. (2010). "Climategate Scientist Cleared in Inquiry, Again", *Scientific American*, 1 de julio, <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=climategate-scientist-cleared-in-inquiryagain> (consultado el 29 de octubre de 2010).

Forrester, J. W. (1951). US Patent 2,736,880, "Multicoordinate digital information storage device" (coincident-current system), filed mayo de 1951, issued 28 de febrero, 1956.

Forrester, J. W. (1958). "Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers", *Harvard Business Review*, 36 (4), julio-agosto, 37-66.

Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications, 464 pp.

Forrester, J. W. (1969). *Urban Dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications, 285 pp.

Forrester, J. W. (1971). *World Dynamics*. Wright-Allen, Cambridge, MA.

Forrester, J. W., Low, G. W., Mass, N. J. (1974). "The Debate on World Dynamics: A Response to Nordhaus", *Policy Sciences* 5, 169-190.

Forrester, J. W. (1992). "From the Ranch to System Dynamics: An Autobiography", en "Management Laureates: A Collection of Autobiographical Essays", vol. 1, editado por Arthur G. Bedeian, JAI Press, [http://www.friends-partners.org/GLOSAS/Peace%20Gaming/System%20Dynamics/Forrester's %20papers/Forrester-Ranch.html](http://www.friends-partners.org/GLOSAS/Peace%20Gaming/System%20Dynamics/Forrester's%20papers/Forrester-Ranch.html)

Forrester, J. W. (1998). "Designing the Future" paper presentado en la Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 15 de diciembre de 1998. <http://sysdyn.clexchange.org/sdep/papers/Designjf.pdf>

Franses, P. H. (2002). "A concise Introduction to Econometrics", Cambridge University Press, Londres.

Fukuyama, F. (1992). "The End of History and the Last Man", Free Press, Nueva York, 1992. ISBN: 0-02-910975-2.

Gardner, Toby (2004). "Limits to Growth? A Perspective on the Perpetual Debate", *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 1, 2, 121-138.

García, Dolores (2009). "A new world model including energy and climate change data", *The Oil Drum*, <http://europe.theoil Drum.com/node/5145> (consultado el 15 de agosto de 2010).

Georgescu-Roegen, Nicholas (1971). "The Entropy Law and the Economic Process", Harvard University Press, Cambridge, MA.

Georgescu-Roegen, Nicholas (1977). "The steady state and ecological salvation: a thermodynamic analysis", *BioScience*, 27, 4, pp. 266-270.

Georgescu-Roegen, Nicholas (1979a). "Myths about energy and matter", *Growth and Change*, 10, 1, pp. 16-23.

Georgescu-Roegen, Nicholas (1979b). "Comments on the papers by Daly and Stiglitz" en Smith, V. Kerry (ed.), *Scarcity and Growth Reconsidered*, RFF y John Hopkins Press, Baltimore, MD.

Giarini, Orio y Loubergé, Henry (1978). "Les Rendements Decroissants de la technologie", Arnoldo Mondadori, Milano.

Gibbon, E. (1776-1788). "The Decline and Fall of the Roman Empire" [William] Strahan y [Thomas] Cadell, in the Strand, Londres.

Goeller, H. E. y Weinberg, Alvin, M. "The Age of Substitutability", *The American Economic Review*, vol. 68, nº 6 (diciembre de 1978), pp. 1-11.

Golub, R. y Townsend, J. (1977). "Malthus, Multinationals and the Club of Rome", *Social Studies of Science*, vol. 7, pp. 201-222.

Goodman, George, J. W. (bajo el seudónimo de Adam Smith) (1987). "Debt, the Grim Reaper", *The New York Times*, 12 de abril, <http://www.nytimes.com/1987/04/12/books/debt-the-grimreaper.html> (consultado el 2 de diciembre de 2010).

Gore, A. (2007). "The Assault on Reason", Penguin, Nueva York.

Gordon, R. B., Bertram, M. y Graedel, T. E. (2006). "Metal stocks and sustainability", *Proc. Natl. Acad. USA*, 103 (5), 1209-1214.

Groshong, K. (2002). *The Noisy Response to Silent Spring: Placing Rachel Carson's Work in Context*, Pomona College, Science, Technology, and Society Department Senior Thesis <http://www.sts.pomona.edu/ThesisSTS.pdf> (consultado en septiembre de 2009), not available any more in 2011; kindly provided by Richard Worthington (RKW14747@pomona.edu)

Hagens, Nate (2007). "Climate Change, Sabre Tooth Tigers and Devaluing the Future", *The Oil Drum*, <http://www.theoil Drum.com/node/2243> (consultado el 15 de febrero de 2011).

Hall, C. A. S. (1988). "An assessment of several of the historically most influential theoretical models used in ecology and of the data

provided in their support”, *Ecological Modelling*, vol. 43 pp. 5-31.

Hall, C. A. S., Powers, R. y W., Schoenberg (2008). “Peak oil, EROI, investments and the economy in an uncertain future”, pp. 113-136 en Pimentel, David (ed.), *Renewable Energy Systems: Environmental and Energetic Issues*, Elsevier, Londres.

Hall, Charles, A. y Day, John, W. Jr. (2009). “Revisiting the Limits to Growth after peak oil”, *American scientist*, vol. 97, p. 230.

Hanjra, M. A. y Qureshi, M. E. (2010). “Global water crisis and future food security in an era of climate change”, *Food Policy*, vol. 35, Issue 5, pp. 365-377.

Hardin, Garrett (1968). “The Tragedy of the Commons,” *Science*, vol. 162, pp. 1243-1248.

Hansen, James (2007). “Climate catastrophe”, *The New Scientist*, vol. 195, Issue 2614, pp. 30-34.

Harte, J. y Socolow, R. H. (1971). “Patient Earth”, Holt, Rinehart y Winsto, Nueva York.

Heinberg, Richard (2006). “The Oil Depletion Protocol”, New Society Publishers, Canadá, ISBN: 0865715 637.

Heinberg, Richard (2010). “Beyond the Limits to Growth”, Post Carbon Institute, Foundation series concepts, 28 de julio issue, <http://www.postcarbon.org/report/122404-foundation-conceptsbeyond-the-limits-to> (consultado el 6 de septiembre de 2010).

Heinlein, R. A. (1952). “Pandora’s box”, February 1952 issue of *Galaxy magazine*, pp. 13-22.

Herrera, A. (1977). “Catástrofe o Nueva Sociedad? Modelo Mundial Latinoamericano”, Ottawa, International Development Research Center.

Hirayama, T. *British Medical Journal*, 282(1981)1393.

Hogan, G (2006). *Discover*, octubre de 2006, <http://>

www.discover.com/issues/ oct-06/cover/

Hoggan, J. (2009). "Climate cover-up", Greystone, Vancouver.

Hook, Mikael, Bardi, Ugo, Feng, Lianyong y Pang, Xiongqi (2010). "Development of oil formation theories and their importance for peak oil", *Marine and Petroleum Geology*, 27, 9, 1995-2004, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2010. 06.005.

Hotelling, Harold (1931). "The Economics of Exhaustible Resources", *Journal of Political Economy*, 39: 137-175.

Houthakker, Hendrik, S. (2002). "Are Minerals Exhaustible?", *The Quarterly Review of Economics and Finance*, vol. 42 pp. 417-421.

Hubbert, M. K. (1956). "Nuclear Energy and the Fossil Fuels. Presented before the Spring Meeting of the Southern District", *American Petroleum Institute, Plaza Hotel, San Antonio, TX, marzo 7-9, 1956.*

Hubbert, M. K. (1977). "Role of Geology in Transition to a Mature Industrial Society", *Geologische Rundschau*, 66, n° 3, 654-678.

Huebner, Jonathan (2005). *Technology Forecasting & Social Change*, n° 72, p. 980.

IPCC (2007). "Climate Change 2007: Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996 pp.

IPCC (2009). "Statement by Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change on stolen emails from the Climatic Research Unit at the University of East Anglia, United Kingdom", <http://www.ipcc.ch/pdf/presentations/WGIstatement04122009.pdf> (consultado el 12 de septiembre de 2010).

Jevons, William Stanley (1866). "The Coal Question, An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines", *Library of Economics and Liberty*, <http://www.econlib.org/library/YPDBooks/Jevons/jvnCQ.html> (consultado el 28 de noviembre de 2010).

Karnani, Mahesh y Annala, Arto (2009). "Gaia, again", BioSystems, vol. 95, pp. 82-87.

Kelly, K. (1994). "Out of Control", Fourth Estate, Londres.

Kenney, J. F. (1996). "Considerations about recent predictions of impending shortages of petroleum evaluated from the perspective of modern petroleum science", Energy World, 240, 16-18.

Kenney, J. F., Shnyukov, A. Y. E., Krayushkin, V. A., Karpov, V. G., Kutcherov, V. G. y Plotnikova, I. N. (2001). "Dismissal of the claims of a biological connection for natural petroleum", Energia, 22 (3), 26-34.

King, M. y Elliot, C. (1997). "A Martian View of the Hardinian Taboo", British Medical Journal, vol. 315, pp. 1441-1443.

Kirby, M. W. (1977). "The British Coalmining Industry, 1870-1946", MacMillan, Londres.

Koehler, J. E. (1973). The Journal of Politics, 35, pp. 513-514.

Kolata, G. (2009). "Playing it safe in cancer research", The New York Times, 28 de junio.

Krugman, Paul (2008). "Limits to Growth and Related Stuff", The New York Times, <http://krugman.blogs.nytimes.com/2008/04/22/limits-to-growth-and-related-stuff/> (consultado el 2 de diciembre de 2010).

Kurzveil, Raymond (2005). "The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology" (Viking Books, Nueva York, ISBN: 0-670-03384-7).

Laherrere, Jean (2004). "Present and future energy problems", HEC MBA Sustainable Development seminar, <http://www.hubbartpeak.com/laherrere/HEC-long.pdf> (consultado el 8 de noviembre de 2010).

Larouche, L., H. (1983). "There are no Limits to Growth", The New Benjamin Franklin House, Nueva York.

- Lasky, S. G. (1950). "How Tonnage and Grade Relations Help Predict Ore Reserves", *Engineering and Mining Journal*, 151: 81-85.
- Laudadio, L. (1970). "On the dynamics of air pollution: a correct interpretation", *Canadian Journal of Economics*, vol. 3, pp. 563-571.
- Lewis, G. (2002). "Systems Thinking about Purpose", *Australasian Journal of Information Systems*, December special issue, pp. 50-58.
- Lightfoot, H. D. (2007). "Understand the three different scales for measuring primary energy and avoid errors", *Energy*, vol. 32, pp. 1478-1483.
- Lomborg, Bjorn (2001). "The Skeptical Environmentalist", Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Lotka, A. J. (1925). "Elements of physical biology", Williams & Wilkins Co: Baltimore, MD.
- Lorenz, Edward N. (March 1963). "Deterministic Nonperiodic Flow", *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20 (2): 130-141.
- Lovelock, J. E. (1965). "A physical basis for life detection experiments", *Nature*, 207 (7): 568-570, doi:10.1038/207568a0 DOI:dx.doi.org
- Madden, M. (1979). "Recent Developments in Urban Dynamics: A Review Article", *The Town Planning Review*, vol. 50, n° 2 , pp. 216-231.
- Mann, Michael, E., Bradley, Raymond S., Hughes, Malcolm K. (1998). "Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries", *Nature*, 392: 779-787, doi:10.1038/33859.
- Marxsen, Craig, S. (2003). *The Independent Review*, vol. VII, n° 3, invierno de 2003, pp. 325-342.
- Maxwell, James Clerk (1868). "On Governors", 16, *Proceedings of the Royal Society of London*, pp. 270-283.
- McCleary, G. F. (1953). "The Malthusian population theory", *Faber*

and Faber Limited, Londres.

McGarity, T. O., Wagner, W. E. (2008). "Bending Science", Harvard University Press, Cambridge, MA.

Meadows, Donella, H., Dennis, L., Meadows, Jorgen, Randers y William W., Behrens, III (1972). "The Limits to Growth", Nueva York: Potomac.

Meadows, Dennis, William, W., Behren III, Donella Meadows, Roger F., Naill, Jorgen Randers y Erich, K. O., Zahn (1974). Dynamics of Growth in a Finite World, Cambridge: Wright-Allen Press.

Meadows, D., Richardson, J. y Bruckmann, G. (1982). "Groping in the Dark: the first decade of global modelling", Wiley, Chichester.

Meadows, Donella, H. (1999a). "Chicken Little, Cassandra, and the Real Wolf", Whole Earth, primavera de 1999, <http://wholeearth.com/issue/2096/article/72/chicken.little.cassandra.and.the.real.wolf> (consultado el 20 de agosto de 2010).

Meadows, Donella, H. (1999b). "Leverage points: places to intervene in a system", The Sustainability Institute, www.sustainer.org/pubs/Leverage_Points.pdf (consultado el 14 de septiembre de 2010).

Meadows, Donella H., Meadows, Dennis L. y Randers, Jorgen (1992). Beyond the Limits, Chelsea Green, Post Mills, VT.

Meadows, D. H., Randers, J. y Meadows, D. L. (2004). Limits to Growth: The 30-Year Update Chelsea Green, White River Junction, VT.

Mesarovic, M. y Pestel, E., Mankind at the Turning Point: The Second Report to The Club of Rome 1974. Dutton, Nueva York, ISBN: 0-525-03945-7.

Michaels, David (2008). "Doubt is their product", Oxford University Press, Nueva York.

Mikesell, R. F. (1995). "The Limits to Growth, a reappraisal",

Resources Policy, vol. 21, Issue 2, junio de 1995, pp. 127-131.

Montford, A. W. (2010). "The Hockey Stick Illusion", Stacey International, Londres.

Moxnes, E. (2000). "Not only the tragedy of the commons: misperceptions of feedback and policies for sustainable development", System Dynamics Review, 16(4), 325-348.

Moxnes, E. (2004). "Misperceptions of basic dynamics, the case of renewable resource management", System Dynamics Review, 20 (2) 139-162.

Moxnes, E. y Saysel, A. K. (2009). "Misperceptions of global climate change: information policies", Climatic Change, 93 (1-2): 15-37.

Mukherje, Siddharta (2010). "The Emperor of All Maladies: A Biography of Cancer", Scribner, Nueva York.

Myrtveit, Magne (2005). "Working papers in System dynamics", <http://www.ifi.uib.no/sd/workingpapers/WPSD1.05WorldControversy.pdf> (consultado el 20 de julio de 2010).

National Academy of Sciences (2006). Surface Temperature Reconstructions for the Last 2.000 Years, [http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=11676# toc](http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=11676#toc) (consultado en julio de 2010).

Nebbia, G. (1997). "Bisogno di Storia e di Futuro", Futuribili, New Series, Gorizia (Italy) 4 (3) 149-82.

Nebbia, G. (2001). "Twenty twenty five", Futures, 33, pp. 43-54.

Nordhaus, W. D. (1973). "Word Dynamics: Measurements without Data", The Economic Journal, nº 332.

Nordhaus, W. D. (1992a). "Lethal Models", Brookings Papers on Economic Activity 2, 1.

Nordhaus, W. D. (1992b). "An optimal transition path for controlling greenhouse gases", Science, 258 (20 de noviembre)

1315-1319.

Nordmann, A. (2008). "Singular Simplicity The story of the Singularity is sweeping, dramatic, simple-and wrong", IEE Spectrum, <http://spectrum.ieee.org/robotics/robotics-software/singular-simplicity> (consultado en agosto de 2010).

Nørgård, Jørgen Stig, Peet, John, Ragnarsdóttir Kristín Vala (2010). "The History of The Limits to Growth", Solutions, febrero, 26, <http://www.thesolutionsjournal.com/node/569> (consultado el 10 de agosto de 2010).

Norgate, T., Rankin, J. (2002). "Tops at Recycling, Metals in sustainable development", CSIRO sustainability papers, <http://www.bml.csiro.au/susnetnl/netw130E.pdf> (consultado el 31 de agosto de 2010).

O'Neill, Brendan (2010). "Think the Earth is Finite, Think Again", <http://www.spiked-online.com/index.php/site/article/9867/> (consultado el 19 de noviembre de 2010).

O'Neill, Gerard (1974). "The Colonization of Space", Physics Today, 27, septiembre issue, 32-40.

Odum, H. T. (1994). Ecological and General Systems: An Introduction to Systems Ecology, Colorado University Press, Colorado.

Ong, E., Glantz, S. A. (2000). "Hirayama's work has stood the test of time Public Health Classics", Bulletin of the World Health Organization, 78 (7), 938.

Ordway, SH. (1953). "Resources and the American dream: including a theory of the limit of growth", Ronald, Nueva York, p. 281.

Oreskes, N. y Conway, E. M. (2010). "Merchants of Doubt", Bloomsbury, Nueva York.

Papert, S. (1980). Mindstorms, Basic Books, Nueva York, NY.

Passel, P., Roberts, M. y Ross L. (1972). New York Times, 2 de abril.

Paul, G. S. y Cox, E. D. (1996). "Cyberevolution and future minds", Charles River Media, Rockland, MA.

Pearce, Fred (2010). "Peoplequake: Mass Migration, Ageing Nations and the Coming Population Crash", Transworld Publishers Ltd., ISBN: 13: 9781905 811342, ISBN 10: 1905811349.

Peccei, A. y Ikeda, D. (1984). "Before it is too late", Kodansha International, Tokyo.

Phillips, A. W. (1950). "Mechanical Models in Economic Dynamics", *Economica*, New Series, vol. 17, n° 67, 283-299.

Phillips, A. W. (1954). "Stabilization policy in a closed economy", *Economic Journal* 64, pp. 290-L321.

Papp, J. F. (2005). "Recycling Metals", United States Geological report <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/recycle/recycmyb05.pdf> (consultado el 31 de agosto de 2010).

Ponting, Clive (2007). "A New Green history of the world", Vintage books, Londres.

Popper, S. W. Lempert, R. J. y Bankes S. C. (2005). "Shaping the Future", *Scientific American*, 292 (4): 66-71.

Prins, Gwyn, et al. (2010). "The Hartwell Paper-A new direction for climate policy after the crash of 2009", London School of Economics, http://eprints.lse.ac.uk/27939/1/HartwellPaper_English_version.pdf (consultado el 14 de noviembre de 2010).

Rábago, K. R., Lovins, A. B. y Feiler, T. E. (2001). "Energy and Sustainable Development in the Mining and Minerals Industries", IIED report, http://www.iied.org/mmsd/mmsd_pdfs/041_rabago.pdf Retrieved Aug 31 2010.

Rademaker, M. y Kooroshy, J. (2010). "The Global Challenge of Mineral Scarcity", Essay for the Conference: Enriching the Planet, Empowering Europe-Optimising the use of natural resources for a more sustainable economy, La Haya, 26 y 27 de abril de 2010, <http://www.clingendael.nl/resource scarcity> (consultado el 4 de septiembre de 2010).

Radetzki, M. N. (2010). "Peak Oil and other threatening peaks-Chimeras without substance", Energy policy, en prensa.

Ravaioli, C. y Ekins, P. (1995). "Economists and the Environment: What the Top Economists Say about the Environment", Zed Books, Londres, 212 pp.

Reijnders, L. (2006). "Cleaner nanotechnology and hazard reduction of manufactured nanoparticles", Journal of Cleaner Production, vol. 14, Issue 2, pp. 124-133.

Reynolds, D. B. (1999). "The mineral economy: how prices and costs can falsely signal decreasing scarcity", Ecological Economics 31, 155.

Reynolds, D. B. (2000). "The case for conserving oil resources: the fundamentals of supply and demand", OPEC Review (junio).

Regis, E. (1994). "The Great Mambo Chicken and the Transhuman Condition", Addison Wesley, Reading, MA.

Regis, E. (2004). "The Doomsayer", Wired Magazine, http://www.wired.com/wired/archive/5.02/ffsimon_pr.html (consultado el 22 de noviembre de 2010).

Revelle, R. y Suess, H. (1957). "Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during past decades", Tellus 9: 18-27.

Richardson, L. F. (1922). "Weather prediction by the numerical process", Cambridge University Press, Londres.

Robock, A. L., Oman y G. L., Stenchikov (2007). "Nuclear winter revisited with a modern climate model and current nuclear arsenals: Still catastrophic consequences", J. Geophys. Res., 112, D13107, doi: 10.1029/2006 JD008235.

Roma, P. (2003). "Resources of the sea floor", Science, vol. 299, nº 5607, pp. 673-674.

Sadiq, M. (1992). "Toxic Metal Chemistry in Marine Environments", Taylor & Francis, Washington, ISBN: 0824786 475.

- Sandback, Francis (1978). "The rise and fall of the Limits to Growth debate", *Social Studies of Science*, vol. 8, nº 4, pp. 495-520.
- Sandberg, A. y Boström, N. (2008). "Whole Brain Emulation: A Roadmap. Technical Report #2008-3", Future of Humanity Institute, Oxford University, [http://www.fhi.ox.ac.uk/ Reports/2008-3.pdf](http://www.fhi.ox.ac.uk/Reports/2008-3.pdf) (consultado el 11 de septiembre de 2010).
- Schoijet, M. (1999). "Limits to Growth and the rise of Catastrophism", *Environmental History*, vol. 4, nº 4, pp. 515-530.
- Senge, P. M. y Sterman, J. D. (1992). "Systems thinking and organizational learning: Acting locally and thinking globally in the organization of the future", *European Journal of Operational Research*, vol. 59, Issue 1, pp. 137-150.
- Shen, H. y Fossberg, E. (2003). "An overview of recovery of metals from slags", *Waste Management*, vol. 23, Issue 10, pp. 933-949.
- Shoham, Yohav y Leyton-Brown, Kevin (2008). "Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations", Cambridge University Press, Cambridge, ISBN: 9780521 899437.**
- Shubik, M. (1971). "Modeling on a Grand Scale", *Science*, vol. 174, p. 1014.
- Simmons, M. (2000). "Revisiting The Limits to Growth: Could The Club of Rome Have Been Correct, After All?", <http://www.simmonsco-intl.com/files/172.pdf>
- Simon, J. (1981). "The Ultimate Resource", Princeton University Press, Princeton.
- Skinner, Brian J. (1976). "A Second Iron Age Ahead?", *American Scientist*, vol. 64 (mayo-junio issue), pp. 258-269.
- Skinner, B. (1979). *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 76, nº 9, pp. 4212-4217.
- Slade, M. (1982). "Trends in Natural-Resource Commodity Prices: An Analysis of the Time Domain", *Journal of Environmental*

Economics and Management, vol. 9, pp. 122-137.

Smith, V. L. (1968). "Economics of Production from Natural Resources", Am. Econ. Rev. 58, 409-431.

Solow, R. (1957). The Review of Economics and Statistics, vol. 39, nº 3, pp. 312-320.

Solow, R. (1974). "The Economics of Resources or the Resources of Economics," American Economics Review, 64: 1-14.

Sohn, Ira. (2005). "Long-term projections of non-fuel minerals: We were wrong, but why?", Resources Policy, vol. 30, Issue 4, pp. 259-284.

Spector, R. (2011). "The War on Cancer A Progress Report for Skeptics", The Skeptical Enquirer, vol. 34. 1, enero/febrero de 2010, http://www.csicop.org/si/archive/category/volume_34.1 (consultado el 27 de febrero de 2011).

Staniford Stuart (2010). "Patent Stat Charts", <http://earlywarn.blogspot.com/2010/08/patent-statschart.html> (consultado el 11 de septiembre de 2010).

Starr, Steven (2009). "Catastrophic Climatic Consequences of Nuclear Conflict", http://www.icnnd.org/Documents/Starr_Nuclear_Winter_Oct_09.pdf (consultado el 10 de noviembre de 2010).

Stegerman, J. J. y Solow, A. R. (2002). "A Look Back at the London Smog of 1952", Environmental Health Perspectives, vol. 110, nº 12, diciembre issue, <http://ehp.niehs.nih.gov/docs/2002/110-12/editorial.html> (consultado el 3 de septiembre de 2010).

Sterman, J. D. (2000). "Business Dynamics: Systems Thinking and Modelling for a Complex World", Irwin/McGraw-Hill: Nueva York.

Sterman, J. D. (2002). "All models are wrong: reflections on becoming a system scientist", System Dynamics Review, vol. 18, nº 4, pp. 501-531.

Sterman J. D. y Booth L., Sweeney (2007). "Understanding

Public Complacency About Climate Change: Adults' mental models of climate change violate conservation of matter", *Climatic Change*, 80, 213-238.

Sterman, J. D. (2011). "A banquet of consequences", Climate interactive blog, <http://climateinteractive.wordpress.com/2011/01/03/john-sterman-a-banquet-of-consequences-at-2010-sdm-conference-at-mit/>

Stiglitz, J. E. (1974a). "Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths", *Review of Economic Studies*, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources, 123-137.

Stiglitz, J. E. (1974b). "Growth with Exhaustible Natural Resources: The Competitive Economy", *Review of Economic Studies*, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources, 138-157.

Strauss, L. (1954). "This Day in Quotes: september 16-Too cheap to meter: the great nuclear quote debate", *This day in quotes*, 2009, <http://www.thisdayinquotes.com/2009/09/too-cheap-to-meter-nuclear-quote-debate.html> (consultado el 20 de agosto de 2010).

Sun Tzu, ca. 400 b.c.e. "The Art of War", en "Project Gutenberg", <http://www.gutenberg.org/files/132/132.txt> accessed May 2010 - sec 25 of the 1st chapter 1.25

Tainter, J. A. (1988). *The Collapse of Complex Societies*, Cambridge: Cambridge University Press.

Tainter, J. A. (1996). "Complexity, problem solving and sustainable societies", en "Getting down to earth, Practical Applications of Ecological Economics", Island Press, Washington, ISBN: 1-55963-503-7.

Tarter, J. (2003). "Ongoing Debate over Cosmic Neighbors, *Science*, New Series, vol. 299, nº 5603, pp. 46-47,

Technology Review (2010), "Europe's plan to simulate the entire planet", <http://www.technologyreview.com/blog/arxiv/25126/?ref=rss&a=f> (consultado el 7 de noviembre de 2010).

Tierney, J. (1990). "Betting the planet", New York Times Magazine, diciembre, 2: 79-81.

Tilton, J. E. (2006). "Depletion and the long-run availability of mineral commodities", en M. E. Doggett y J. R. Perry (eds.), *Wealth Creation in Minerals Industry: Integrating Science, Business and Education: Special Publication 12*, Society of Economic Geologists, Littleton, CO.

Tilverberg, Gail (2011). "There is no steady state growth, except at a very basic level", <http://ourfiniteworld.com/2011/02/21/there-is-no-steady-state-economy-except-at-a-very-basic-level/> (consultado el 21 de febrero de 2011).

Tinbergen, J. (1977). "RIO, Reshaping the International Order, a Report to the Club of Rome", New American Library, Nueva York.

Townsend, Robert, L. (1970). *Up the Organization; How to Stop the Corporation from Stifling People and Strangling*, Nueva York: Alfred A. Knopf.

Turco, R. P., Toon, O. B., Ackermann, T. P., Pollack, J. B. y Carl Sagan (1983). "Nuclear Winter: Global consequences of multiple nuclear explosions", *Science*, vol. 222, nº 4630, diciembre issue, pp. 1283-1292.

Turco, R. P. (2007). "Climatic consequences of regional nuclear conflicts", *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2003 -2012.

Turner, G. M. (2008). "A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality", *Global Environmental Change*, 18 (2008) 397-411.

Tustin, A. (1954). "The Mechanism of Economic Systems: An approach to the problem of economic stabilization from the point of view of control system engineering", *The Economic Journal*, vol. 64, nº 256, pp. 805-807.

Tyndall, J. (1863). "On radiation through the earth's atmosphere", *Phil mag*, 25, fourth series.

United Nations (1987). "Report of the World Commission on

Environment and Development”, General Assembly Resolution 42/187, 11 de diciembre de 1987.

Vajk, P. J. (1976). “The Impact of Space Colonization Upon World Dynamics”, Technol. Forecast. Soc. Change 9, pp. 361-400.

Vajk, P. (2002). <http://settlement.arc.nasa.gov/CoEvolutionBook/LIFES.HTML#Limits%20to%20Growth-wronger%20than%20ever> (consultado el 28 de agosto de 2010).

Valero, A., Valero, A. (2010). “A prediction of the energy loss of the world’s mineral reserves in the 21st century”, Energy, en prensa.

Verheijen, F. G. A., Jones, R. J. A., Rickson, R. J., Smith, C. J. (2009). “Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe”, Earth Sciences Review, vol. 94, Issues 1-4, pp. 23-38.

Victor, P. A. (2008). “Managing without growth: slower by design, not disaster”, Northampton, MA, Edward Elgar,

Vinge, Vernor (1993). “The Coming Technological Singularity”, <http://www-rohan.sdsu.edu/faculty/vinge/misc/singularity.html>

Volterra, V. (1926). “Variazioni e fluttuazioni del numero d’individui in specie animali conviventi”. Mem. R. Accad. Naz. dei Lincei. Ser. VI, 2, 31-113.

Ward, P. (2009). “The Medea Hypothesis: Is Life on Earth Ultimately Self-Destructive?”, Princeton University Press, Princeton, ISBN 13: 978-0-691-13075-0.

Weart, S. R. (2003). “The Discovery of Global Warming”, Cambridge, Harvard Press.

Warren Thompson (2003). “Encyclopedia of Population”, MacMillan Reference, pp. 939-940. ISBN: 0-02-8656 77-6.

White, Steven (2002). “Rant: we love this stuff”, <http://www.stevewhite.org/log/archive/20020707.htm> (consultado el 27 de agosto de 2010).

Wilensky, U. (1999). NetLogo, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>.

Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling,
Northwestern University, Evanston, IL.

**Wikipedia (2010). “Abundance of the elements (data page)”,
[http://en.wikipedia.org/wiki/Abundances_of_the_elements_
%28data_page%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Abundances_of_the_elements_%28data_page%29) (retrieved 31 Aug 2010).**

Zimmermann, Erich (1933). World Resources and Industries, Nueva York, Harper & Brothers, 1951. World Resources and Industries, 2nd revised ed. Nueva York, Harper & Brothers.

ÍNDICE de términos

A

agotamiento

agotamiento de los recursos

agricultura

atractor

aviones atómico

B

ballenas

C

calentamiento global

cambio climático

caos

capital

capital industrial

carbón

Cassandra

clima

Club de Roma

CO2

cobre

coches voladores

colapso

colonización espacial

complejidad

conejos

consenso

contaminación

control poblacional

crecimiento

crecimiento económico

curva de Hubbert

D

depreciación

depredador

dinámica de sistemas

Dyson, esfera de

E

econometría

emulación cerebral

energía

energía nuclear

entorno

EROEI

EROI

escenario

espacio virtual

estaño

exploración espacial

extensión de la vida

extralimitación

F

fértil

fertilizantes

flujo

función de producción

G

Gaia

gases de efecto invernadero

gas natural

Gran Recesión

H

hambruna

Hardinian Taboo

homeostasis

I

impuesto sobre el carbono

J

juegos de guerra

L

ley de Lasky

lineal

lobby

lobbying

M

Malthus

maltusianos/as

mano invisible

modelización del mundo

modelo

modelo funcional

modelo Lotka-Volterra

movimiento ecologista

N

niebla tóxica

no lineal

no renovable

P

palo de hockey, controversia del

paradoja de Jevons

petróleo

pico de Hubbert

pirámide de recursos

plomo

presa

progreso

pronosticar

propaganda

punto L5

Q

quinta disciplina

R

reactores

recursos

recursos minerales

rendimientos decrecientes

renovable

reservas

residuo de Solow

retroalimentación

retroalimentación de refuerzo

retroalimentación estabilizadora

revolución verde

S

self-organized criticality

simulación

singularidad tecnológica

sistemas caóticos

sistemas complejos

sobreexplotación

sobrepoblación

stock

sustituibilidad

T

tecnología

tierras raras

transhumanismo

U

umbral mineralógico

V

validación (del modelo)

Z

zorros

Índice

PRÓLOGO A LA EDICIÓN ESPAÑOLA

PRÓLOGO

AGRADECIMIENTOS

CAPÍTULO 1. Introducción

CAPÍTULO 2. La historia de "Los límites del crecimiento"

CAPÍTULO 3. Sobre modelos y simulaciones

CAPÍTULO 4. La modelización de la dinámica de sistemas

CAPÍTULO 5. Modelizando el mundo real: la caza de ballenas en el siglo XIX

CAPÍTULO 6. La modelización del mundo mediante la dinámica de sistemas

CAPÍTULO 7. Críticas a "Los límites del crecimiento"

CAPÍTULO 8. Los recursos minerales como límites del crecimiento

CAPÍTULO 9. El progreso tecnológico y los límites del crecimiento

CAPÍTULO 10. El debate político

CAPÍTULO 11. El retorno de la modelización del mundo

CAPÍTULO 12. Conclusión: los desafíos futuros

EPÍLOGO. ¿Tiene sentido seguir evocando transiciones hacia sociedades industriales sustentables?

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE TÉRMINOS

